

مقدمة قصيرة جدًّا

ديفيد والاس

فلسفة علم الفيزياء

ترجمة إبراهيم سند أحمد


أهم جروبات على تليجرام
باحثون
هنا سور الأزبكية
غواص في بحر الكتب
قناة مصر الثقافية و الفنية

فلسفة علم الفيزياء

مقدمة قصيرة جدًّا

تأليف
ديفيد والاس

ترجمة
إبراهيم سند أحمد

مراجعة
الزهراء سامي





فلسفة علم الفيزياء

ديفيد والاس

Philosophy of Physics

David Wallace

الناشر مؤسسة هنداوي
المشهرة برقم ١٠٥٨٥٩٧٠ بتاريخ ٢٦ / ١ / ٢٠١٧

يورك هاوس، شييت ستريت، وندسور، SL4 1DD، المملكة المتحدة
تليفون: ٨٣٢٥٢٢ ١٧٥٣ (٠) ٤٤ +
البريد الإلكتروني: hindawi@hindawi.org
الموقع الإلكتروني: https://www.hindawi.org

تصميم الغلاف: ولاء الشاهد

الترقيم الدولي: ٩٧٨ ١ ٥٢٧٣ ٣٣٦٣ ٥

صدر الكتاب الأصلي باللغة الإنجليزية عام ٢٠٢١.
صدرت هذه الترجمة عن مؤسسة هنداوي عام ٢٠٢٣.

المحتويات




أهم جروبات على تليجرام
باحثون
هنا سور الازبكية
غواص في بحر الكتب
قناة مصر الثقافية و الفنية



إلى مايا، أهدي هذا الكتاب.



أهم جروبات علي تليجرام
باحثون
هنا سور الأزبكية
غواص في بحر الكتب
قناة مصر الثقافية و الفنية

شكر وتقدير

إنَّ هذا الكتاب مستمَد بشكلٍ كبير من عَقْد قضيته في تدريس فلسفة الفيزياء للطلاب في جامعة أكسفورد. وأنا أخصُّ بالشكر هارفي براون؛ إذ كان لأفكاره عن الزمكان تأثيرٌ كبير في الفصل الثاني، لكن الرؤى التي أبداها الطلاب والزملاء الرائعون قد شكَّلت كلَّ جزء في هذا الكتاب. إنني ممتنٌّ أيضًا إلى لاثا مينون من دار نشر جامعة أكسفورد وإلى مقيِّم مجهول، وإلى هانا والاس؛ وذلك لتعليقاتهم الدقيقة والمدروسة بشأنِ مخطوطة الكتاب.



أهم جروبات علي تليجرام
باحثون
هنا سور الأزبكية
غواص في بحر الكتب
قناة مصر الثقافية و الفنية

المقدمة

حتى عهدٍ قريب لا يتجاوز مئاتٍ قليلة من السنوات، كان مصطلح «فلسفة الفيزياء» سيُعَد تحصيلَ حاصل. حينئذٍ، كانت الفيزياء هي فلسفة الطبيعة، وتمثَّلت مهمةُ فيلسوف الطبيعة في فَهْم العالَم الطبيعي. فنحن نجد أنَّ كتابات أرسطو على سبيل المثال، تتضمَّن من الرياضيات والعلوم بقَدْر ما تتضمن من علم الأخلاق وعلم الجمال، وقد وصف نيوتن عمله بأنه فلسفة، وقارنه بفلسفاتِ منافسيه. إنَّ الفيزياء لم تبدأ في إرساء قواعدها باعتبارها علمًا قائمًا بذاته والانفصال عن الفلسفة انفصالًا جليًّا إلا في وقتٍ حديث نسبيًّا.

ليست الفيزياء بأولِ العلوم التي تنفصل عن الفلسفة ولا آخرها. كثيرًا ما يقال إن الفلسفة لا تحرِز تقدمًا، لكن نشأة العلوم المستقلة هي، إلى حدٍّ كبير، ما يمثِّل تقدُّم الفلسفة. نشأة الرياضيات في العصور القديمة، والفيزياء في عصر النهضة، والأحياء بعد داروين، والمنطق في أوائل القرن العشرين، وعلوم الكمبيوتر في أواسط القرن العشرين، والعلوم الإدراكية مؤخرًا؛ أدَّى كلٌّ من هذه الحالات إلى إحراز تقدُّمٍ كبير، وحل العديد من المسائل الجدلية، واتضاح العديد من الأمور الغامضة؛ مما أدَّى إلى تشكيل علمٍ قائم بذاته وقادر على إحراز تقدُّم أكبر. يعرِّف الفيلسوف دانييل دينيت الفلسفةَ بأنها ما نفعله عندما لا نعرف الأسئلة التي ينبغي طَرْحها؛ وعندما نفهم ما يكفي لأن نتمكَّن من طرح الأسئلة، والبدء في الإجابة عنها، يتمخَّض علمٌ جديد من رحم الفلسفة.

في المجالات التي شهِدت حدوثَ هذا مؤخرًا — العلوم الإدراكية أو المنطق على سبيل المثال — لم تزل العلوم والفلسفة تخصُّصات متشابكة. غير أنَّ الفيزياء كان لديها قرونٌ ثلاثة لتكتسب استقلالها، والآن قد تحقَّق استقلالها عن الفلسفة بشكلٍ كلي تقريبًا؛ فقليل من علماء الفيزياء الذين يحظَون بالتدريب المهني هم مَن يتعلمون قدرًا كبيرًا من الفلسفة،

وقليلٌ من الفلاسفة هم مَن يعرفون ما هو أكثر من أساسيات الفيزياء. فكيف يتبقى إذن فلسفةٌ للفيزياء؟

السبب الأوضح والأبسط هو أنه على الرغم من أنَّ الأسس المفاهيمية للفيزياء صارت أكثرَ وضوحًا بكثيرٍ مما كانت عليه قبل عصر نيوتن، فلا يزال هناك الكثير مما لا نفهمه. فليست الفيزياء حساباتٍ غير مبرَّرة، بل إن عالِم الفيزياء الحصيف يكون على درايةٍ بالمفارقات والأسئلة المفاهيمية التي تظهر في عمله. الحق أنَّ الحسابات الجيدة نادرًا ما تكون غير مبرَّرة؛ إذ لا يوجد حدٌّ فاصل بين الجوانب الواقعية والتنبُّئِية في الفيزياء وبين أسسِها المفاهيمية. تلك هي المهمة الأولى لفيلسوف الفيزياء؛ فقَدْر كبير من فلسفة الفيزياء لا ينفصل عن هذا الجانب من الفيزياء نفسها، وربما يساعد الوضوحُ الفلسفي على إحراز تقدُّمٍ في الفيزياء.

السبب الثاني هو أن مناهج العلوم والتوجُّهات التي ينبغي أن يتَّخذها العلماء والفلاسفة والناس بوجهٍ عامٍّ بشأن هذه المناهج، من الأمور المهمة، ولا يمكن فَهْم هذه ولا تلك في حالة الجهل بالتفاصيل. ففي أفضلِ الحالات، تتكوَّن لدينا نظرةٌ قاصرةٌ عن المنهج العلمي، وعن التوجُّه الذي ينبغي أن نتخذَه تجاه النظريات العلمية إذا اكتفينا بدراستها دراسةً مجردَّة؛ ومن ثَم تتمثَّل إحدى المسئوليات المهمَّة لفيلسوف الفيزياء في فحص النتائج والعمليات الفيزيائية، ومعرفة الدروس التي تُعلِّمنا إياها هذه العمليات بشأن العلوم بوجهٍ عام. نؤكِّد مجددًا أنَّ هذه المهمة ليسَت لغير المتمرِّسين في الفيزياء وغير المتحمِّسين لها؛ ذلك أنَّ فَهْم المنهج العلمي مهمٌّ لإنتاج علومٍ تتسم بمستوًى عالٍ من الجودة، وتزيد درجة هذه الأهمية أكثرَ وأكثرَ في علوم الفيزياء الحديثة.

المهمة الثالثة لفيلسوف الفيزياء هي أيضًا متصلة بعلم الفيزياء لكن بمعنًى مختلف؛ وهي التوصُّل إلى الفَهْم الأمثل لطبيعة العالَم، بناءً على النظريات الفيزيائية التي نستخدمها لوصفه. في العصور القديمة، كان فَهْم الطبيعة العميقة للعالَم منوطًا بالميتافيزيقا، أما في العصور الحديثة، فقد صار هذا الفَهْم يعتمد بشكلٍ أساسيٍّ على أفضل النظريات الفيزيائية، غير أنَّ هذه النظريات لا تُفصح من تلقاء نفسها عمَّا تنطوي عليه من دلالاتٍ ومعانٍ. ومن هذا المنطلق، فإنَّ فلسفة الفيزياء هي الجسرُ بين الميتافيزيقي والفيزيائي، أو يمكن القول إن فلسفة الفيزياء تعلِّمنا كيفيةَ التوصُّل إلى إنتاجٍ ميتافيزيقي يستند إلى المعرفة العلمية.

ومن الأفكار التي ستُكرَّر بكثرة في هذا الكتاب أنَّ فلسفة الفيزياء علمٌ متداخل التخصصات؛ فهي تقف بين الفيزياء البحتة والفلسفةِ السائدة والفلسفة العامة للعلوم،

وهي تصل الأفكارَ والرؤى بين هذه التخصصات. يعمل بعضُ فلاسفة الفيزياء في أقسام الفلسفة ويحملون المسمَّى الوظيفي «فيلسوف فيزياء» أو «فيلسوف علوم»، ولكن الغالبية منهم فيزيائيون في الحقيقة. (يُعَد أينشتاين — دون شكٍّ — هو فيلسوف الفيزياء الرائد في القرن العشرين). وهذا الكتاب يتناول فلسفةَ الفيزياء باعتبارها تخصصًا علميًّا، لا باعتبارها مؤسسةً داخل الأوساط الأكاديمية في القرن الحادي والعشرين.

ومن الأفكار الأساسية الأخرى أنَّ التفاصيل مهمةٌ للغاية. فنادرًا ما تهتم فلسفة الفيزياء بعلم الفيزياء ككل، بل تهتم بموضوعاتٍ محدَّدة في علم الفيزياء. ففي كل مجال معيَّن في الفيزياء، يمكننا أن ننظر إلى الأسئلة المفاهيمية — أو الفلسفية — التي يطرحها ذلك المجال والمعضِلات التي تظهر في كلٍّ من المجالات الفرعية، باعتبارها موضوعاتٍ متمايزة، حتى وإن لم يوجد حدٌّ فاصل بينها كما قد يبدو في الظاهر. يوجد العديد من الأمثلة على ذلك، وقد أصبح بعضها مهمًّا في أعمالٍ حديثة للغاية، وهي تتعامل مع حدود الفيزياء الحالية. على سبيل المثال:

- تتناول فلسفة «نظرية المجال الكمي» الأسئلةَ المفاهيمية التي تنشأ عن نظرياتنا الحالية الأكثرِ جوهريةً التي تدعم النتائجَ الرائعة، التي حقَّقتها تجربة مصادم الهدرونات الكبير في جينيف. من تلك الأسئلة مثلًا: أحقيقيٌّ أنَّ ثوابت الطبيعة خضعت للضبط الدقيق بطريقةٍ ما، كي تؤديَ إلى إنشاء الكون الكبير المعقَّد الذي نراه من حولنا؟ أم أنَّ طَرْح هذا السؤال عديمُ الجدوى أصلًا؟ وما المنهج العلمي المنطقي لوضع نظرياتٍ تفوق تلك النظريات، التي اختُبِرت في تجربة مصادم الهدرونات الكبير، في عالَم تكثُر فيه النظريات وتندُر فيه البراهين؟
- تستكشف فلسفة «علم الكونيات» كيفيةَ التعامل مع الكون ككل. بما أننا لم نرصد سوى كون واحد، فكيف لنا أن نفهم النظريات التي تقول بأرجحية ظهور كونٍ ما على ظهور كونٍ آخر، فضلًا عن اختبارها؟ هل يظل افتراضُ أن الكون الذي نعيش فيه هو كونٌ واحد من عدة أكوان فسيحة؛ تفكيرًا علميًّا مقبولًا؟ وكيف لنا أن نختارَ بين نماذجَ كونيَّةٍ مختلفة بناءً على براهينَ معقَّدة وغير مباشرةٍ تتعلَّق بالتساؤل عن أيٍّ منها هو الصحيح؟
- تهتم فلسفة «الجاذبية الكمومية» بآخر ما انتهت إليه الفيزياء الحديثة: البحث عن وجهٍ للتقارب بين النسبيةِ العامة، وهي النظرية الأفضل للجاذبية، ونظريةِ الكم، وهي الإطار الذي كُتبت فيه كلُّ النظريات الفيزيائية الأخرى. فهل نظرية الأوتار

— المنافس الأبرز لهذا التقارب — تعد علمًا جيدًا أم سيئًا، أم إنها لا تندرج ضمن نطاق العلم على الإطلاق؟ ما المخاطرة في المزاعم المذهلة بأن الثقوب السوداء، التي نتوقَّع ببساطة أنَّ شيئًا لا يهرُب منها، تتصرَّف مثل الأجسام الساخنة العادية، وكيف يمكن تقييم هذه المزاعم في ظل استبعاد أيِّ احتمالٍ لإجراء اختباراتٍ تجريبية؟ وكيف يمكن حلُّ المفارقات المفاهيمية بشأن الثقوب السوداء الكمومية أو تبديدها؟

على الرغم من ذلك، فالأمثلة الأهم تتعلَّق بنظرياتٍ أقدمَ وأعم، وإن كان ذلك في معظم الأعمال التأسيسية والفلسفية في الأعوام الخمسين الأخيرة على الأقل. يهتم الجزء الأكبر من الأعمال التي تتناول فلسفةَ الفيزياء بثلاثة مجالات وهي: فلسفة الزمكان (التي توفِّر المفاهيم التي تمكِّننا من فهمِ المكان والزمان والحركة، وهي المفاهيم المركزية في الفيزياء على الأرجح)، وفلسفة الميكانيكا الإحصائية (التي تحدِّد العلاقات بين النظريات الفيزيائية على مستوياتٍ مختلفة، وتقف بين معارفنا الفيزيائية الأكثرِ جوهرية، وبين أي اختبارٍ أو تطبيقٍ لتلك المعارف الفيزيائية)، ولعل المثال الأشهر هو ميكانيكا الكم (التي تحاول أن تفهم — وربما تغيِّر — اللغةَ التي كُتبت بها معظمُ النظريات الفيزيائية في القرن الماضي، كالنظريات المسئولة عن بناء مسرِّعات الجسيمات والترانزستورات، وتلك التي تقدِّم تصورًا للحظات الأولى في عمر الكون).

يدور هذا الكتاب حول هذه المجالات. يبدأ الفصل الأول بأسئلةٍ عامة نسبيًّا بشأن المنهج العلمي وطبيعة النظريات العلمية بوجهٍ أعمَّ. ويتناول الفصل الثاني الإجابةَ عن السؤال: «ما الحركة؟» في سياقٍ تاريخي؛ ومن ثَم فهو يتناول نشوءَ علم الميكانيكا على يدِ نيوتن وغيره في القرن السابع عشر. (فمن الأفكار الأساسية الشائعة في فلسفة الفيزياء أننا نحتاج إلى الانتباه إلى تاريخ الأفكار، وإلى كيفيةِ اهتداء علماء الفيزياء العظماء إلى المفاهيم الغريبة التي صاغوها.) وبعد هذا التمهيد، نصل في الفصل الثالث إلى تناولِ نظرية النسبية، و«المفارقات» المفترَضة التي تنطوي عليها هذه النظرية، والفهم الأعمق لمفاهيم المكان والزمان والحركة المذكورة فيها. يوضِّح الفصل الرابع كيف أن الميكانيكا الإحصائية تساعدنا في فهم العلاقات بين النظريات على النطاقَين العياني والمجهري، وكيف أن هذا الفهم يتضمَّن على ما يبدو مفاهيمَ جديدة — مثل عدم القابلية للانعكاس والاحتمالية — وهي مفاهيمُ لا تنطوي عليها نظرياتنا الأكثرُ جوهريةً، وربما كانت غير متسقةٍ معها. ويتناول الفصلان الخامس والسادس ميكانيكا الكم؛ بدءًا بطَرْح المفارقات التي يثيرها هذا

العلم، ثم تناول الكيفية التي يمكن أن تُحل بها هذه المفارقات، وانتهاءً بالسؤال عن سببِ أهمية ذلك للفيزياء بوجهٍ عام.

ثمَّة فكرةٌ عامَّة ثالثة في فلسفة الفيزياء وهي أهمية الرياضيات. فنظريات الفيزياء الحديثة تُصاغ برياضياتٍ مجرَّدة نوعًا ما، ولا يمكن فَهْم المسائل الفلسفية في الفيزياء — فضلًا عن المساهمة في حلها — من دون فَهْم هذه النظريات بكامل تفاصيلها، بما في ذلك التفاصيلُ الرياضية. (لا عجب إذن من أنَّ فلاسفة الفيزياء عادةً ما يكونون من الحاصلين على تدريبٍ أكاديميٍّ في الفيزياء في مستوى الخرِّيجين، حتى حينما يعملون لدى أقسام الفلسفة.) وفي كتابٍ كهذا، لا يمكن أن أقدِّم شرحًا وافيًا لأيٍّ من نظرية الزمكان الحديثة أو الميكانيكا الإحصائية أو نظرية الكم — فضلًا عن الثلاثة معًا — ومن ثَم لا يَسعني الادعاءُ بأن القارئ سيفهم المسائل الفلسفية من هذا الكتاب وحده فهمًا تامًّا. على الرغم من ذلك، أرجو أن أطرح من التفاصيل والعمق ما يكفي لأن يساعدَ القارئ المتدرِّب في الفلسفة على فَهْم مدى تأثير مسائل الفيزياء في الأسئلة العميقة التي تمثِّل أهميةً لديه، ويساعد المتدرِّب في الفيزياء على الربط بين القضايا المفاهيمية المطروحة في الكتاب وبين تدريبه الفني، ويساعد جميعَ القراء على التعرُّف على المعضِلات المركزية في المجال وسببِ أهميتها.

حتى في المجالات الأساسية الثلاثة التي أتناولها، وحتى مع تنحيةِ العديد من المواضيع الشديدة التخصص التي لا يستوعبها كتابٌ كهذا، يوجد العديد من الأسئلة المثيرة للاهتمام التي لا يسعني أن أطرحها. ولا شك أنَّ آرائي الخاصة بشأن أهم الأسئلة وبشأن المحاولات الأفضل للإجابة عنها، كان لها دورٌ في اختيار المواضيع التي ينبغي طرحُها وطريقة الطرح، ورغم أنني أشير في كثيرٍ من الأحيان إلى أن بعض الأسئلة «خلافية» أو «جدلية» وأطرح عدة إجابات محتملة على تلك الأسئلة، فأنا متأكد من أن القراء المطلعين على هذه المواضيع سيلاحظون استبعادَ تفنيداتهم المفضَّلة، أو المرور على مواقفهم المفضَّلة مرورَ الكرام، أو حتى تجاهلها تمامًا. وإلى هؤلاء القراء، أتقدَّم بالاعتذار؛ وللقراء غير المطلعين على فلسفة الفيزياء — وهم المستهدفون بهذا الكتاب — أدرجت العديدَ من الكتب الأخرى التي تتناول المزيدَ من التفاصيل ووجهات النظر الأخرى.

الفصل الأول

مناهج العلوم وثمارها

الفيزياء فرعٌ من العلوم، لكنَّ ثمَّة جانبًا يجعل فلسفةَ الفيزياء ليست جزءًا من فلسفة العلوم فحسب. فعادةً ما يقف فيلسوف العلوم على مسافةٍ بعيدة قليلًا من العلم، ويدرُس ممارسته بصفته غيرَ متخصص وإنما مهتم، مركِّزًا اهتمامه على المنهج العلمي بوجهٍ عام، وكذلك الأسئلة العامة بشأن الموثوقية والقيمة في منتج العلوم. غير أنَّ فلاسفة الفيزياء يهتمُّون في المعتاد بأسئلةٍ أكثرَ تحديدًا؛ ليست عن العلوم بوجهٍ عام ولا عن الفيزياء بوجهٍ عام، بل أسئلة تتعلَّق بالمفاهيم التي تطرحها نظرياتٌ فيزيائيةٌ بعينها، ومنها على سبيل المثال: ما الذي تخبرنا به نظريةُ النسبية العامة عن المكان والزمان؛ كيف ينبغي لنا فَهْم القانون الثاني للديناميكا الحرارية؛ أيوجد خطأ جوهريٌّ في نظرية الكم؟ ورغم أنهم لم يتحفَّظوا في انتقادِ مناهج علماء الفيزياء في حالاتٍ معينة، فإنهم في الوقت نفسه لم يركِّزوا على المزيد من الأسئلة العامة بشأن منهجية الفيزياء.

ونظرًا إلى كل هذه الأسباب، فإن الأسئلة التي طرحتها فلسفةُ العلوم العامة وما قدَّمَته من إجاباتٍ مبدئية عليها؛ تمثِّل أساسًا بالغَ الأهمية في فلسفة الفيزياء. ولهذا سأتناول في هذا الفصل مقدمةً عن المنهج العلمي، وعن بعض الألغاز الخاصة بطريقة التفكير في النظريات العلمية بوجهٍ عام.

المنهج العلمي: من الاستقراء إلى التكذيب وما بعده

ما الذي يحدُث إذا أفلتَّ تفاحةً من يدك؟ إنها تسقط. افعل الشيءَ نفسه مع تفاحةٍ أخرى، أو مع التفاحة نفسها من ارتفاع مختلِف، وسوف تسقط أيضًا. ينطبق الأمر نفسه على

الأجسام الأخرى، مثل الكُمَّثْرى وقوالب الطوب والقطط والأطفال. تعطينا التجربةُ العديد من الأمثلة التي تبرهن أن «الأجسام كذا وكذا تسقط إذا أُفلِتت» وبضعة أمثلة نادرة تُبرهن أن «الأجسام كذا وكذا لا تسقط إذا أُفلتت»؛ ومن ثَم يمكننا اعتبار أنَّ «كل الأجسام تسقط إذا أُفلتت» استنتاجٌ مبدئيٌّ بناءً على ملاحظاتنا.

يُطلق على هذا النهج «الاستقراء الإحصائي». وربما يكون هذا النهج هو أبسط نماذج المعرفة التجريبية وأقدمَها، وهو يُجرى على النحو التالي: يُجمَع عدد كبير من الملاحظات الرصدية بالصيغة: «هذا الشيء هو X وهو أيضًا Y»، مع عدم وجود عددٍ كبير من الملاحظات الرصدية بالصيغة: «هذا الشيء هو X وهو ليس Y»؛ ومن ثمَّ نستنتج أن «كل ما هو X هو أيضًا Y».

ربما يكون هذا نموذجًا جيدًا للكيفية التي يتعلَّم بها الأطفال الجاذبية. (أنا لا أعتقد ذلك في واقع الأمر، لكنني لست بمتخصصٍ في العلوم الإدراكية.) «ربما» يعكس درجةً من الطريقة التي يتقدَّم بها مجالٌ جديد من العلوم في بداية نشأته. لكنه نموذج عديم الجدوى حين يُستخدم لوصف منهج الفيزياء، أو أي علم ناضج آخر، وإن كانت هذه المحاولة الوصفية تقريبيةً للغاية.

لماذا؟ يكمُن جزءٌ من السبب في أنه لا يمكن الاعتمادُ على «الرصد فقط». إن العالَم غنيٌّ ومعقَّد ويمكننا النظرُ إليه بطرقٍ لا حصرَ لها؛ فنحن بحاجةٍ إلى تكوين بعض الآراء بشأنِ ما نختار أن نرصده. ينطبق هذا حتى على ما نرصده بأعيننا وآذاننا، لكن الصورة تتضاعَف إلى مائة ضعفٍ في الفيزياء الحديثة؛ حيث تُنفق ملايين الدولارات أو المليارات منها على تطوير القدرة، لإجراء عمليات رصدٍ محدَّدة لا تُختار عشوائيًّا بأي حالٍ من الأحوال. ويكمُن جزءٌ آخر من السبب في أن النظريةَ العلمية أدقُّ كثيرًا من صيغة «كل ما هو X هو أيضًا Y»، وأعقد. فليست الصيغةُ الفعلية لنظرية نيوتن عن الجاذبية — ولا حتى بصورة عامة تقريبية — «كل الأجسام تسقط إذا أُفلتت»؛ وإنما تُصاغ على النحو التالي: «تتناسب قوةُ الجذب المؤثِّرة بين جسمَين مع حاصل ضرب كتلتَيهما، مقسومًا على تربيع المسافة بين مركزَيهما.» وليس هذا بالشيء الذي يمكن أن ترصده من العالم دون تفكير.

الواقع أنَّ كلَيهما وجهان لعملةٍ واحدة؛ فالخطأ الذي يقع فيه الاستقراء الإحصائي هو الخلط بين عملية «التوصل» إلى نظريةٍ ما (ما يطلق عليه الفلاسفة «سياق الاكتشاف») وبين عملية جَمْع البراهين على النظرية وتقييمها («سياق التعليل»).

ثمَّة نهجٌ بديل عظيم التأثير قد طُرِح في القرن العشرين على يد الفيلسوف كارل بوبر، وهو أحد فلاسفة العلم القلائل الذين سمِع بهم علماء الفيزياء. ووفقًا للنسخة الأبسط والأشهر من نهج بوبر، فإن المنهج العلمي عمليةٌ مكوَّنة من خطوتَين:

(١) التوصل إلى نظرية (بغضِّ النظر عن الكيفية)؛
(٢) محاولة «تكذيب النظرية»؛ أي اختبار بعض التنبؤات التي تطرحها النظرية.

وإذا لم تجتَز النظريةُ الاختبارَ، فإنها تُكذَّب؛ بمعنى أنها تُنحَّى ونعود إلى الخطوة الأولى. وإذا نجحت، يستمر اختبارُها بطرقٍ مختلفة.

يُطلق على هذا النهج «مذهب التكذيب»، وعلى خلاف الاستقراء الإحصائي، يُعَد هذا النهج صورةً مبسَّطة من المنهج العلمي؛ ومن ثَم فهو يُجسِّد بعضَ سماته المركزية، لكن ينبغي تجنُّب التعامل مع تفاصيل الصورة بحِرفيةٍ بالغة، وإلا فسيؤدي ذلك إلى حدوث لَبْس على الأرجح.

يمكننا أن نرى هذا من خلال مثالٍ واقعي من فيزياء القرن التاسع عشر. وفقًا لقانون الجاذبية لنيوتن، تدور الكواكب حول الشمس في مدارات بيضاوية، ونقطة حضيض المدار هي النقطة الأقرب إلى الشمس. ووفقًا لجاذبية نيوتن أيضًا، في حالة عدم وجود كواكب أخرى، تظل نقطة الحضيض للكوكب ثابتةً في النقطة نفسها من الفضاء في كل مدار، لكن بما أنه «توجد» كواكب أخرى، فإن نقطة الحضيض تبعُد عن الشمس قليلًا، في كل مدارٍ عن الذي قَبْله. معنى هذا أنَّ نقطة الحضيض «تتقدَّم» بمقدارٍ يمكن حسابه بقانون الجاذبية لنيوتن.

عندما أجرى علماء الفيزياء هذه العمليةَ الحسابية، وجدوا تباينًا بين القيمة التي تنبَّأت بها النظرية، والقيمة التي قاسوها في حالة اثنَين من الكواكب السبعة المعروفة آنذاك؛ وهما عطارد وأورانوس. كانت القيم المقيسة ضئيلة، وكذلك كانت قيمةُ التباين؛ فبالنسبة إلى كوكب عطارد الذي يكون عند أقربِ نقطةٍ بينه وبين الشمس، على مسافةٍ تبلغ ٤٤ مليون كيلومتر، تنبَّأت النظرية بأنَّ مقدار تقدُّم نقطة الحضيض لديه سيساوي تقريبًا ٣ آلاف كيلومتر في كل دورة مدارية، وجاءت القيمة المقيسة لتقدم نقطة الحضيض أقل بنحو ٢٠ كيلومترًا. غير أنَّ العمليات الحسابية والقياسات كانت دقيقةً بما يكفي — وإن أُجريَت في القرن التاسع عشر — لأن تؤكد أن التباين حقيقي.

وفقًا لمبدأ التكذيب، كان ينبغي أن تكون تلك نهايةَ قانون الجاذبية لنيوتن. فقد طرحت النظريةُ تنبؤًا، وتبيَّن زيفُ هذا التنبؤ؛ هذا إذن أوان الانتقال إلى النظرية التالية! لكن هذا لم يحدث، ولم يكن ينبغي له أن يحدُث. فقد ظلت نظرية الجاذبية لنيوتن ناجحةً لمئات السنين، وأدَّت إلى إنتاج الكثير من التنبؤات الناجحة والتفسيرات؛ وكان التخلي عنها والبدء من جديد — في غياب أي أفكار ملموسة لصياغة نظرية أفضل — من شأنه أن يشلَّ علم الفلك. والأهم من ذلك أنه لم يكن صحيحًا تمامًا أنَّ هذا التباين يعني تكذيبَ نظرية الجاذبية لنيوتن. فعلى غرار جميعِ نظريات الفيزياء، لا تطرح نظريةُ نيوتن للجاذبية التنبؤاتِ إلا بالاستعانة بما يُطلق عليه الفلاسفة «الافتراضات المساعدة»: الكواكب الموجودة، والمواضع التي توجد فيها، ومدى ضخامتها، والقميرات والكويكبات والسُّحب الغبارية الأخرى التي يمكن أن تكون قريبةً منها، والتأثيرات الأخرى غير المتعلِّقة بالجاذبية التي قد يكون لها دور، وحتى كيفية عمل التلسكوبات وأدوات قياس الزمن. ربما يكون السبب في شذوذ التقدُّم المداري هو قصورًا في نظرية الجاذبية، لكن من الوارد جدًّا أيضًا أن يكون السبب هو وجودَ كوكب بعيد آخر لا نعرفه. ويمكننا بالفعل أن نعكس هذا المنطق على النحو التالي: بافتراض أن نظريةَ الجاذبية لنيوتن صحيحة، فأين ينبغي أن يوجد الكوكب الآخر كي يحلَّ مسألةَ الشذوذ؟ عندما طرح علماء الرياضيات ذلك السؤال بشأن كوكب أورانوس وأجابوا عنه، ثم نظر علماء الفلك إلى تلك النقطة في سماء الليل، اكتشفوا الكوكب نبتون حيث كان ينبغي أن يوجد بالضبط.

ماذا عن كوكب عطارد؟ جرَّب العلماء الحيلةَ نفسها؛ إذا كان هناك كوكب مجهول أقرب إلى الشمس، فربما يفسِّر الشذوذ. أُطلق على هذا الكوكب الجديد اسم «فولكان»، لكنَّ أحدًا لم ينجح في العثور عليه؛ غير أنَّ ذلك لم يكن دليلًا حاسمًا على عدم وجوده، فمن المفترض أنه كوكبٌ شديد القرب من الشمس؛ ومن ثمَّ سيكون شبهَ خفيٍّ في وهجها. لكن بعد مرور وقتٍ طويل، اختلف التفسير تمامًا؛ تنبأت «نظرية النسبية العامة» لأينشتاين — النظرية المنافسة لنظرية الجاذبية — بمقدار التباين المرصود بالضبط من دون الحاجة إلى أي كوكب إضافي.

لدينا إذن واقعتان واضحتان من وقائعِ التكذيب؛ ونحن ندرك، بأثرٍ رجعي، أنَّ إحداهما كانت بمثابة انتصار لنظرية الجاذبية لنيوتن؛ حيث إنها لم تكذِّب النظرية في حد ذاتها بل الافتراضات المساعدة بشأن المجموعة الشمسية، مما أدَّى إلى اكتشافِ الكوكب

الثامن، بينما كانت الواقعة الأخرى تكذيبًا فعليًّا يتمثَّل في استبدالِ نظرية جديدة محسَّنة بنظرية الجاذبية لنيوتن. لكنا لا نستطيع التوصُّل إلى هذه الاختلافات «إلا» بعد إمعان النظر بأثرٍ رجعي؛ فلم تكن فكرة كوكب فولكان غير منطقية في جوهرها، ولم يكن هناك أيُّ تطوُّر في المنهج العلمي يثني العلماء عن افتراضها، وما كان ينبغي لذلك أن يحدث على أي حال.

ما من اتفاقٍ في الآراء، بشأن كيفية تقديم سرديةٍ إيجابيةٍ للمنهج العلمي تُضيف تحسيناتٍ على مبدأ التكذيب، كما لا يوجد اتفاقٌ في الآراء على إمكانية تحقيق ذلك في الأساس. (يطرح فيلسوف العقل جيري فودور الاقتراحَ الساخر التالي: «حاوِل ألا تتفوه بأي شيء زائف، وحاوِل أن تظل يقِظًا متأهبًا».) على الرغم من ذلك، توجد بعض الأفكار العامة المشتركة بين العديد من السرديات، وستفي هذه الأفكار بالأغراض التي نرمي إليها (وسوف أتبع الفيلسوفَ إمري لاكاتوس والفيلسوف توماس كون، متجاهلًا العديدَ من الفروق بين سردية كلٍّ منهما):

(١) ينبغي ألَّا نفكرَ من منظورِ وجود نظرياتٍ ثابتةٍ تُصاغ على نحوٍ نهائي ثم تُختبر بعد ذلك، بل ينبغي أن يُستبدل بهذا الإطار برامجُ بحثيةٌ مستمرَّة (لاكاتوس) أو «نماذج» (كون) يُستخدم فيها جوهرُ النظرية؛ من أجل تفسير الظواهر عَبْر مجموعةٍ من الافتراضات المساعِدة التي يمكن تغييرها لتفسير البراهين التي تُجمَع تباعًا.

(٢) ما يؤدي تحديدًا إلى تقدُّم البرامج البحثية هو اكتشاف السمات الشاذَّة التي تفسَّر فيما بعد. والمعيار الذهبي لهذه التفسيرات أن تؤديَ إلى تنبؤاتٍ جديدةٍ يجري تأكيدها بعد ذلك (مثل كوكب نبتون).

(٣) بمرور الوقت، يمكن أن تتراكم السماتُ الشاذَّة غير المفسَّرة، أو تتزايد وتيرةُ الاختلاق في التغييرات التي تطرأ على الافتراضاتِ المساعدة اللازمة لتفسير السمات الشاذَّة، وتصبح مرتجلة وغير ناجحة في إنتاج تنبؤاتٍ جديدة، وقد يحدُث كلا الأمرَين. وفي هذه الحالة، يوصَف البرنامج البحثي بأنه آخذٌ في التدهور (لاكاتوس)، ويُوصف النموذج بأنه في أزمة (كون).

(٤) على الرغم من ذلك، فمن النادرِ للغاية أن نتخلَّى عن برنامجٍ بحثيٍّ إلا عندما يتوافَر برنامج منافسٌ أنجح منه. ذلك أنَّ البرامج البحثية لا تُختبر على الكون وتُقارَن معه فحسب، بل تُختبر أيضًا على البرامج البحثية الأخرى وتُقارَن معها. (فلم تُعتبر نظرية

الجاذبية لنيوتن نظريةً خضعت للتكذيب، إلا بعد نجاح النسبية العامة، التي تمثِّل البرنامج البحثي الجديد.)

مشكلة التمييز: متى يكون المنهج علميًّا؟

لم يكن اهتمام بوبر بمبدأ التكذيب وبالمنهج العلمي اهتمامًا خالصًا بهما. فقد سعى أيضًا إلى وضع معيار يحدِّد متى يُعتبر أحد نُهُج جمع المعرفة من العلوم، وقد وجد هذا المعيار في شرط القابلية للتكذيب (وبناءً على هذا فإنَّ كلًّا من التحليل النفسي الفرويدي والاقتصاد الماركسي — وهما مجالان من مصادر إزعاجه — ليسا بالمناهج العلمية). ويبدو أنَّ علماء الفيزياء المعاصرين يفعلون الشيء نفسَه في كثير من الأحيان؛ إذ ينبذون سؤالًا أو حتى مجالًا فرعيًّا في بعض الأحيان (مثل نظرية الأوتار) أو حتى مجالًا بأكمله (مثل الفلسفة!) باعتباره «غير قابل للتكذيب»؛ ومن ثَم غير علمي.

إنَّ تطبيق هذا المعيار دون تفكير إفراط في التبسيط؛ فلا توجد نظرية قابلة للتكذيب بمعزِل عن غيرها. لكن الفكرة لها وجاهتها على أي حال، ويبدو أنَّ الأهم لا يكمُن فيما إذا كانت إحدى النظريات قابلة للتكذيب في حدِّ ذاتها أم لا، بل في وجودِ أدلةٍ تؤيِّد هذه النظرية. وبناءً على هذا، يصبح سؤالٌ على غرار: أيٌّ من هذه النظريات صحيح؟ سؤالًا علميًّا إذا كان متوافقًا مع المناهج العلمية التي ترتكز على البراهين في نهاية الأمر.

يمكننا أن نرى مثالًا على هذا من خلال دراسةِ حالةٍ حديثة: الجدال الذي استمر على مدار الأعوام الثلاثين الأخيرة بشأن وجود المادة المظلمة. في المجرَّات الحلزونية مثل مجرتنا، غالبًا ما توجَد المادةُ المرئية في صورة نجوم وغاز وغبار بين هذه النجوم، ويمكننا استخدامُ قانون الجاذبية لنيوتن؛ للتوصُّل إلى السرعة التي يُفترض أن النجوم تدور بها في المجرة («منحنى الدوران» للمجرة) بناءً على توزيع تلك المادة. ومن المعروف منذ أوائل ثمانينيات القرن العشرين أنه يوجد اختلافٌ بين القِيَم المتوقَّعة والقِيَم المقيسة. (وحتى استبدال نظرية النسبية العامة لأينشتاين بنظرية الجاذبية لنيوتن لا يشكِّل فرقًا في هذه الحالة؛ إذ يظل التباين موجودًا.) ظهرت أيضًا حالاتٌ مماثلة من الانحراف في عملياتِ رصدٍ واسعةِ النطاق لمجموعاتٍ كاملةٍ من المجرات.

كان التفسير الوحيد المقترَح لهذا الانحراف هو ما يُسمَّى «المادة المظلمة»، وهي المادة التي لا تُرى من خلال أجهزة التلسكوب، ولا يمكن الكشف عنها إلا من خلال تأثير جاذبيتها. ما من شيءٍ غريبٍ في فكرة المادة المظلمة في حد ذاتها؛ فالنجوم مرئيةٌ لأنها تتوهَّج

بالضوء، بينما قد تصعُب رؤية المادة التي لا تضيء ذاتيًّا. (الكواكب الأخرى في نظامنا الشمسي ستبدو «مادةً مظلمة» لراصدٍ من نظامٍ شمسيٍّ بعيد، وكذلك ستبدو الأرض أيضًا إن لم نكن قد بدأنا في إرسال إشارات الراديو والتليفزيون.) غير أنَّ تفسير منحنيات الدوران يستلزم أن يكون وزن المادة المظلمة أكبرَ من وزن النجوم والغاز والغبار بنسبةٍ كبيرة؛ مما يعني أنَّ وزن المادة المظلمة كبيرٌ للغاية بما لا يتلاءم على الإطلاق مع هذه التفسيرات الاعتيادية. وحتى يومنا هذا، لا نعرف شيئًا تقريبًا عن ماهيةِ المادة المظلمة، ولم تأتِ المحاولات المباشرة في البحث عنها بأية نتائج.

لهذا السبب، بحثت قلَّةٌ من علماء الفيزياء فكرةَ أنه لا توجد مادةٌ مظلمة على الإطلاق، بل يوجد خطأ في الجاذبية. وقد حقَّقت نظريتهم المنافِسة (ديناميكا نيوتن المعدَّلة) نجاحًا أوليًّا كبيرًا في شرح منحنيات الدوران، وقدرًا جزئيًّا على الأقل من النجاح في شرحِ بعضِ الأدلة الأخرى التي تؤيد وجودَ المادة المظلمة. ووفقًا للمصطلحات التي تناولناها، تُعَد المادةُ المظلمة فرضيةً مساعِدةً ضمن البرنامج البحثي الخاص بالجاذبية القائم بالفعل، أما ديناميكا نيوتن المعدَّلة فهو برنامج بحثي منافِس.

إنَّ جذورَ هذا الجدال تمتدُّ إلى ثلاثين سنة على الأقل، ولم ينجح العلماء حتى الآن في التوصُّل إلى قرارٍ حاسمٍ بشأنه، ولن يحدُث ذلك في المستقبل القريب؛ إذ لا توجد ملاحظاتٌ يمكن رصدها ولا تجربةٌ يمكن إجراؤها، لتكذيب أيٍّ من النهجَين على نحوٍ عقلاني وجيه. لكن هذا لا يعني أنَّ اختيار نظريةٍ ما وتفضيلها عن الأخرى مسألةٌ تعود إلى الذوق. الحق أنَّ التفسيرات التي تطرحها نظريةُ ديناميكا نيوتن المعدَّلة أبسطُ في بعض الحالات من تفسيرات نظرية المادة المظلمة، كما أنها تفسِّر الظواهر التي تنطوي على عددٍ أقل من الأجزاء المتحرِّكة، لكنها تكون أكثرَ تعقيدًا في حالاتٍ أخرى، بل ملفَّقة في بعض الأحيان. لم يظل النقاش ساكنًا؛ فقد ظهرت ملاحظاتٌ رصدية جديدةٌ استلزمت إجراء تعديلاتٍ على نماذج المادة المظلمة، وعلى القوانين الجديدة المقترَحة لديناميكا نيوتن المعدَّلة. وفقًا لتقييمي الشخصي؛ فأنا أرى أنَّ ديناميكا نيوتن المعدَّلة كانت نظريةً منافِسة مقبولة قبل عشرين عامًا، أما الآن، فإنَّ المستوى اللازم من التلفيق والتعديلات الضرورية المخصَّصة لكي تتلاءم النظرية مع البيانات؛ يرجِّح عدم صحَّتها. يتفق معظم علماء الفيزياء الفلكية مع هذا الرأي، مثلما يتضح ذلك في انخفاض الاهتمام بنظرية ديناميكا نيوتن المعدَّلة انخفاضًا حادًّا في الوقت الحالي، مقارنةً بما كان الأمر عليه قبل عشرين سنة. غير أنَّ المسألة لم تُحسم بعد؛ ويمكن للعقلاء من الأشخاص أن يختلفوا بشأن هذه النقطة، ولا يزال العلماء

الجادون مستمرين في العمل على نظرية ديناميكا نيوتن المعدَّلة. ربما تُحسَم المسألة ذات يوم، وحينها فقط، سيحق لنا أن نصف تأييد نظرية ديناميكا نيوتن المعدَّلة بأنه تأييدٌ غير علمي.

ينبغي التأكيد على أن مثال المادة المظلمة/ديناميكا نيوتن المعدَّلة مثالٌ متطرف نسبيًّا؛ فإجراء التجارب وعمليات الرصد في هذه المجالات من الفيزياء الفلكية وعلم الكونيات؛ أصعبُ بكثيرٍ من غيرها من مجالات الفيزياء التي عادةً ما يكون جَمْع البراهين التجريبية أسرعَ فيها وأكثرَ حسمًا. على الرغم من ذلك، فحتى في تلك الحالة المتطرفة، يمكننا أن نرى أن تسوية الخلاف تجري من خلال التطوُّرات الجديدة للنظريات والمقترحات الجديدة، لإجراء عمليات الرصد والملاحظة، أي إنها تجري من خلال وسائل علمية معروفة ومحدَّدة.

نقص الإثبات ومذهب الذرائعية ومذهب الواقعية

في حالة الاختيارِ بين نظريتَين وفقًا للطريقة العلمية، لا بد أن يعتمد هذا الاختيار على الأدلة، لكن ماذا إذا كانت النظريتان مختلفتَين وتطرحان التنبؤات نفسها بالضبط؟ يُطلِق الفلاسفة على هذه الحالة «نقص إثبات النظرية بالأدلة»؛ وتتمثَّل معضِلة «نقص الإثبات» في الاختيار بين نظريتَين من هذا القبيل.

فبشكلٍ أو بآخر، تُعَد مسألة نظريتي المادة المظلمة/ديناميكا نيوتن المعدَّلة مثالًا على معضلةِ نقص الإثبات، إذ لا توجد تجربةٌ ولا ملاحظةٌ مرصودةٌ تخبرنا بأي النظريتَين صحيح؛ وذلك بسبب إمكانية إكمال تفاصيل النظرية وافتراضاتها المساعدة بطرقٍ مختلِفة لتفسير البيانات نفسها. والحل الواضح لتلك المسألة هو إنتاج المزيد من المعرفة العلمية؛ فبمرور الوقت، ستؤدي قوة الأدلة — كما نرجو — إلى استنتاجٍ أوضح، حتى وإن ظلَّت لدينا بعض الأسئلة الفلسفية عن السبب الذي يدفعنا إلى الوثوقِ في هذا «الاستنتاج الواضح» على الرغم من عدم استبعادِ أيٍّ من النظريتَين استبعادًا حاسمًا. (ويطلق الفلاسفة على هذه الحالات اسم «نقص الإثبات الضعيف».)

وثمَّة حالةٌ أخرى أكثر إزعاجًا، وهي عندما توجد نظريتان لا تطرحان التنبؤات نفسَها وفقًا لمجموعة الأدلة الحالية فحسب، بل وفقًا لكل الملاحظات والقياسات المحتملة أيضًا. وفي هذه الحالة التي يسميها الفلاسفة «نقص الإثبات القوي»، لا يبدو أن مناهج العلوم تلقى قبولًا.

كان الكثير من فلاسفة العلوم يظنون فيما سبق أن هذه الحالة مستحيلة منطقيًّا. وفقًا لمذهب الوضعية (أو الإجرائية أو الذرائعية؛ وينبغي التأكيد مجددًا على أنني لن أقف على الفروق الدقيقة بين كلٍّ من هذه التوجُّهات)، فإنَّ فَهْم محتوى أي نظريةٍ علميةٍ يستلزم التمييزَ بين مزاعمها «الرصدية» ومزاعمها «النظرية». وتُستخدم كلمة «الرصد» في هذا السياق بمعنًى قوي جدًّا؛ حيث إنها تُشير إلى شيءٍ «يمكن التعبيرُ عنه باللغة المستخدمة يوميًّا»، أو «يمكن اختباره بحواسِّ الإنسان من دون مساعدة». فعبارةٌ مثل «سيعرض جهاز الكشف الرقم ٥٫٢٢٨» هي ما يُعَد زعمًا رصديًّا على سبيل المثال. يرى أنصار مذهب الوضعية أنَّه لا يمكن فَهْم المزاعم غير الرصدية بمعزِل عن آثارها الرصدية؛ فعبارةٌ مثل «تتكوَّن الذرةُ من إلكترونات وبروتونات» هي مرادف للقول: «إذا أجريت هذا القياس، فسأحصل على هذه النتيجة؛ وإذا أجريت ذلك القياس، فسأحصل على تلك النتيجة …». فمن الناحية العملية، ليس محتوى النظرية العلمية سوى مجموعة المزاعم الرصدية التي تطرحها؛ مما يعني أن ما يتبقَّى من النظرية ليس سوى أداةٍ حسابيةٍ للانتقال من مجموعة ملاحظاتٍ رصديةٍ إلى أخرى.

إنَّ ما راقَ الفلاسفةَ في أوائل القرن العشرين — وبعض علماء الفيزياء حتى اليوم — في مذهب الوضعية هو أنه ينبذ أيَّ زعمٍ بشأن أيِّ نظرية إن لم تكن له نتائجُ تجريبية، بوصفه زعمًا لا طائلَ منه. ومما جذبهم إليه على وجه الخصوص، أنه يستبعد نقصَ الإثبات القوي بالضرورة؛ فوفقًا لهذا المذهب، إذا طُرِحَت نظريتان تقدِّمان المزاعمَ الرصدية نفسها، فهما نظرية واحدة تختلفان في طريقة الطرح فحسب. ولهذا يسمح مذهب الوضعية بتجاوز الكثير من اللَّبْس اللفظي والدخول مباشرةً إلى الأسئلة العلمية الفعلية.

ما نقائصه إذن؟ أولًا أنه لا يتلاءم مع الطريقة التي يتَّبعها العلماء في وصف مشاريعهم؛ لأنفسهم أو للآخرين. فعادةً ما يصف علماء الفلك أنفسهم بأنهم يبنون تلسكوبات الراديو للتعلم عن النجوم والمجرات، وليس لأنَّ هذه التلسكوبات تمثِّل اهتمامهم الجوهري. وعندما يحثُّ علماء فيزياء الجسيمات الوزارات الحكومية لإنفاق مبالغَ كبيرةٍ من المال على مسرِّعات الجسيمات، فإنهم يدعمون قضيتَهم بحجة استخدام تلسكوبات الراديو من أجل اكتشاف الحقائق العميقة عن الكون؛ وهي قضية ستضعف كثيرًا إن كان اكتشاف «الحقائق العميقة عن الكون» لا يستلزم سوى فَهْمها بوصفها مزاعمَ غيرَ مباشرة، عن آليات عمل مسرِّع الجسيمات نفسه ليس إلا.

لكنْ ثمَّة سبب أعمق يعيب هذا المذهب؛ وهو أن التمييز بين المزاعم الرصدية والنظرية أصعبُ بكثير مما يبدو عليه. وقد تناولنا جزءًا من هذا السبب بالفعل؛ وهو أنه بسبب الافتراضات المساعِدة، ما من زعمٍ علميٍّ مستقل له نتائجُ رصدية؛ ومن ثَم فإنَّ القائمة التخطيطية الخاصة بالنتائج الرصدية لزعم أن «الذرات تتكوَّن من الإلكترونات والبروتونات» قائمةٌ خياليةٌ فحسب. ففي نهاية المطاف، ترتكز المزاعمُ الرصدية للنظرية العلمية على مزاعمها النظرية، ولا يمكن أن تُفهم فهمًا وافيًا من دونها.

الحق أنَّ الوضع أسوأ من هذا؛ إذ لا يمكن التمييز في حقيقة الأمر بين المزاعم «الرصدية» و«النظرية». فالملاحظات الرصدية «محمَّلة مسبقًا بالنظرية» مثلما يقول الفلاسفة؛ ذلك أننا نحتاج إلى الألفاظ المستخدَمة في النظرية حتى في وصف الملاحظات الرصدية. «جهاز الكشف سيعرض الرقم ٥٫٢٢٨» ... أيُّ جهاز كشفٍ؟ وحدَه جهاز الكشف المصمَّم بالطريقة الصحيحة، ولا بد أن «الطريقة الصحيحة» ستنطوي على أفكارٍ نظرية. فلا يمكن فَهْم مصطلحاتٍ على غرار «الليزر» أو «تلسكوب الراديو» أو «مسرِّع الجسيمات» من دون فَهْم النظرية التي تُستخدم فيها هذه المصطلحات («الليزر» على سبيل المثال عبارةٌ عن شعاع ضوء متماسك ينتج عن انبعاث مُستحَث؛ لكننا سنتحدث بعد ذلك عن معاني الكلمات «متماسك» و«الضوء» و«الانبعاث المُستحَث» ... وهكذا).

قد يبدو أن هذا يقضي على تهديدِ مشكلة نقص الإثبات القوي، إذا لم يكن بإمكاننا فصلُ الأجزاء التي يمكن رصدُها في نظريةٍ ما عن تلك التي لا يمكن رصدُها، فلن يمكننا حتى فَهْم فكرةِ النظريات المختلفة ذات النتائج الرصدية نفسها. وفي أسوأ الحالات، قد يكون لدينا حالةٌ من نقص الإثبات الضعيف، مثل حالة المادة المظلمة/ديناميكا نيوتن المعدَّلة، التي تؤثِّر فيها الأدلة في الجدال، لكن هذا التأثير غير حاسم في الوقت الحاضر. وعلى أي حال، توجد طرقٌ أخرى قد تحدُث بها مشكلة نقص الإثبات القوي.

الطريقة الأولى مضجرة، ولهذا يمكننا التغييرُ منها بعض الشيء. إذا كانت النظرية X تتضمَّن الإلكترونات، على سبيل المثال، فربما تكون النظرية X^*: «تحدُث جميع الملاحظات الرصدية كما لو كانت الإلكترونات موجودة، مثلما يَرِد في النظرية X، لكن الإلكترونات غير موجودة بالفعل». الواقع أنَّ الخطأ في نظريةٍ مثل النظرية X^* خفيٌّ بعض الشيء (إنها مثال على ما يطلِق عليه الفلاسفة «مذهب التشكيك»)، ولكن المشكلة ليست قاصرة على العلم وحدَه. (تأمَّل الجملة: تحدُث جميع الملاحظات الرصدية كما لو كان برج إيفل موجودًا، ولكنه غير موجود.) إذا كنا مهتمين بفلسفة العلوم دون الأحاجي الفلسفية العامة، يمكننا تنحيةُ هذه الحالة جانبًا.

تحدُث الحالة الثانية حينما توجد لدينا نظريتان متطابقتان «فيما عدا» جزءًا إضافيًّا في إحداهما لا يقدِّم أيَّ فائدة تفسيرية. إذا كانت النظرية X نظريةً علمية ناجحة، فسوف تتشكَّل النظرية X^* بأن يُضاف إلى النظرية X عنصرٌ جديد لا يتفاعل مع أيٍّ من العناصر الأخرى، وهو ما يُسمى بـ «العنصر غير ذي الصلة». وفي هذه الحالة، فإن جُلَّ ما يفعله العنصر غير ذي الصلة هو تعقيد النظرية X من دون أن يضيف إليها أيَّ درجة من القوة العلمية؛ ومن ثمَّ يبدو أنَّ التفكير العلمي السليم يقتضي الالتزامَ بالنظرية X. (سنجد مجددًا أنَّ السببَ الدقيق الذي يوضِّح وجاهةَ هذا التفكير وسلامته خفيٌّ بعض الشيء. فقبل مائة عام، كان الفلاسفة سيقولون إن هذا العنصر غيرَ ذي الصلة مستغلقٌ تمامًا. أما اليوم، فالأرجح أنهم سيقولون إنه لا يوجد سببٌ للاعتقاد بوجوده.)

تُبرِز الحالةُ الأكثر إثارةً للاهتمام فرقًا حادًّا بين مناهج علماء الفيزياء و(معظم) الفلاسفة. ففي نظر عالِم الفيزياء المشتغِل بالمجال، يجب أن تُصاغ النظرية في نهاية المطاف بالرياضيات: مجموعة من البنى الرياضية التي تصِف الاحتمالات الظاهرة، وبعض المعادلات التي تحدِّد أيُّ الاحتمالات الظاهرة ممكنٌ من المنظور الفيزيائي. على الرغم من ذلك، يبدو أنَّ العالِم لا يقتصر على الرياضيات فحسب، وثمَّة إغراءٌ قوي على الأقل في أن تتضمن النظرية أكثرَ من ذلك؛ قدرًا من التفسير للظاهرة الكونية طبقًا للنظرية، ووصفَ الظاهرة، وذِكر الأسباب والنتائج التي تؤدي إليها، وذِكر التفسيرات لذلك. إذا كان الأمر كذلك، فهذا يثير احتماليةَ أن توجد نظريتان مختلفتان لهما البنية الرياضية نفسها (ومن ثمَّ النتائج الرصدية نفسها، نظرًا لكيفية ممارسة الفيزياء).

أهذه احتمالية حقيقية؟ رأينا أن أنصار مذهب الذرائعية يجيبون عن هذا السؤال بالنفي؛ إذ يرَوْن أنَّ أيَّ نظريتَين لهما النتائج الرصدية نفسها هما في الحقيقة نظريةٌ واحدة، وُصِفت بطريقتَين مختلفتَين. (لكننا رأينا أن مذهب الذرائعية غيرُ قابلٍ للتطبيق.) ويُجيب أنصار مذهب الواقعية العلمية القياسية عن هذا السؤال بالإيجاب؛ إذ يرَون أنه من الممكن أن تتشاركَ نظريتان مختلفتان البنيةَ الرياضية نفسها. وبالنسبة إلى أنصارِ مذهب الواقعية العلمية البنيوية (أو ما يمكن تسميتهم بالبنيويين) فهم أيضًا لا يرون في ذلك احتماليةً حقيقية؛ إذ يعتقدون أن نظريتَين لهما البنية الرياضية نفسها هما في واقع الأمر وَصْفان مختلفان للنظرية نفسها. إنَّ النهج البنيوي هو الأقربُ إلى الافتراضات الضمنية المستخدَمة في الفيزياء، وهو النهج الذي أتبنَّاه غالبًا في هذا الكتاب، غير أنه يوجد العديد من الأسئلة غير المُجاب عنها بشأن كيفية فَهْمه وتمييزه عن النهج القياسي.

الواقعية العلمية وتغيير النظريات

إلامَ يشير مصطلح «الواقعية العلمية» في سياق الواقعية العلمية القياسية، أو الواقعية العلمية البنيوية؟ وفقًا لوجهةِ النظر التي يتبنَّاها معظم الفلاسفة ومعظم العلماء — وإن كان ذلك ضمنيًّا على الأقل — يشير هذا المصطلح إلى أنَّ نجاح النظريات العلمية الحالية يعطينا سببًا وجيهًا للاعتقاد بأنها صحيحةٌ بالفعل (وليست محضَ أدوات مفيدة للتوصُّل إلى تنبؤات). فصحيح أننا لا نستطيع رَصْد الإلكترونات مثلًا، ولا الكواركات ولا الثقوب السوداء رصدًا مباشرًا؛ أي إننا لا نستطيع رؤيتها أو سماعها أو لمسها، لكنَّ لدينا — وفقًا لمذهب الواقعية العلمية — أسبابًا وجيهةً تجعلنا نعتقد أنها موجودةٌ بالفعل.

للواقعية العلمية حجتان أساسيتان، وكلٌّ منهما مرتبطة بالأخرى. تُستهل الحجتان بالدليل البيِّن الذي يُفيد بأن أفضل نظريات الفيزياء فعَّالةٌ للغاية في وَصْف العالم المادي. (مَن لا يستحق أن يؤخذ على محملِ الجِدِّ هو مَن يؤيد الواقعيةَ العلمية فيما يتعلق بالتنجيم؛ لأن التنجيم ليس نظريةً ناجحة في الأساس.) الحجة الأولى إذن هي أنه لا توجد طريقةٌ وجيهة ولو بشكلٍ طفيف لفَهْم أسباب نجاح هذه النظريات، إلا بافتراض أنها صحيحةٌ بدرجةٍ ما على الأقل. يُطلَق على هذه الحجة في بعض الأحيان «حجة غياب المعجزات» المستقاةُ من ملاحظة الفيلسوف هيلاري بوتنام التي تقول إنها لمعجزةٌ لو أنَّ النظريات العلمية على هذه الدرجة من الفعالية وهي غير صحيحة. على سبيل المثال، تنبأت نظرية الجاذبية لنيوتن بوجود كوكب نبتون في بقعةٍ محدَّدةٍ من الفضاء؛ وحين نظرنا إلى الفضاء وجدنا الكوكب. لا عجب في هذا الاكتشافِ إذا كانت نظرية نيوتن عن الجاذبية صحيحةً؛ لكن هذا الاكتشاف كان سيصبح مصادفةً إعجازيةً إن لم تكن النظرية صحيحة.

أما الحجة الثانية للواقعية العلمية، فتفيد بأنه ما دامت لا تُوجَد (كما رأينا) طريقةٌ فعلية لفصل المحتوى الرصدي في النظرية عن المحتوى غير الرصدي فيها، فإنه لا توجد طريقةٌ تستند إلى مبادئَ محدَّدةٍ يمكن استخدامُها لقبول النظرية العلمية، باعتبارها مناسبةً من المنظور الرصدي من دون قبول النظرية بالكامل. وبناءً على هذا، فحينما تقودنا منهجيةٌ علميةٌ جيدة إلى صياغةِ نظريةٍ علميةٍ واختبارها وقبولها، نكون قد التزمنا بذلك بالإقرار بصحةِ النظرية.

ربما تبدو الواقعية العلمية واضحةً تمامًا؛ أليس التشكيك في النظريات الراسخة نوعًا من التشكيك المناهِض للعلم؟ لكنْ ثمَّة أسبابٌ تدعو إلى التعامل مع هذا المذهب بحذرٍ. وقد تناولنا أولَ هذه الأسباب بالفعل، متمثلًا في التهديد الذي يطرحه نقصُ الإثبات. إذا كان

لدينا نظريتان تطرحان التنبُّؤات الرصدية نفسها، لكنهما تتعارضان إحداهما مع الأخرى، فلا بد أن إحداهما (على الأقل) خاطئة؛ ومن ثمَّ فلا يمكن أن تكون حجةُ غياب المعجزات صحيحة. (وهذا من الأسباب التي تجعل الفلاسفة مهتمين للغاية بمعرفةِ ما إذا كان نقص الإثبات القوي يحدُث بالفعل أم لا.)

أما السبب الآخر، فينبع من تاريخ العلوم، ولا سيما الفيزياء. لقد حدَث مرارًا خلال ذلك التاريخ أن أُطيحَ بنظريةٍ راسخةٍ على الرغم من نجاحها الكبير في طَرْح التنبؤات. فنظريةُ الجاذبية لنيوتن على سبيل المثال «خاطئة» من أحد الجوانب المهمة، وقد حلَّت محلَّها نظرية النسبية العامة؛ ليس من الصواب إذن الاعتقادُ بأنَّ اكتشاف كوكب نبتون كان سيصبح معجزةً لو أنَّ النظرية كانت خاطئة! وبوجهٍ عام، يبدو أن العلوم تتقدَّم جزئيًّا على الأقل عَبْر خطواتٍ ثوريةٍ تُستبدل فيها بالنظريات القديمة أخرى جديدة تتعارَض مع المزاعم المركزية في النظرية القديمة. على سبيل المثال، دأبَ علماء الفيزياء على اعتقاد أن الحرارة عبارةٌ عن مائع، لكنَّهم يعتقدون الآن أنها حركةٌ عشوائيةٌ للجزيئات؛ وقد كانوا يعتقدون أن الضوء عبارة عن اهتزازٍ في «أثير» شامل، وهم يعتقدون الآن أنه يمكن أن يوجد في غياب أيِّ شيءٍ من هذا القبيل. وقد كانت هذه «الحجة التشاؤمية» هي الاعتراضَ الأساسي الذي أُثير ضد مذهب الواقعية على مرِّ التاريخ.

على الرغم من ذلك، قد توجد مُبالغةٌ في التعبير عن مدى تغيُّر النظريات، حتى في الفيزياء. فلا تزال نظريةُ الجاذبية لنيوتن تُدرَّس للطلاب حتى الآن، وليس ذلك على سبيل الإحماء للدرس فحسب (فلعلك تتذكَّر أنَّ الاختصار MOND يشير إلى «نظرية ديناميكا نيوتن المعدَّلة»). والسبب القياسي الذي يُقدَّم تبريرًا لذلك أن نظرية الجاذبية لنيوتن تُعَد تقريبًا ممتازًا للنسبية العامة في ظروفٍ معيَّنة. وبناءً على هذا، يصبح السؤال المطروح أمام أنصار الواقعية العلمية ما يلي: هل تُعَد تنبؤات إحدى النظريتَين نتائجَ تقريبية جيدة لتنبؤات النظرية الأخرى؟ أم إنَّ محتوى النظرية القديمة لا يزال صحيحًا بالتقريب في النظرية الجديدة؟

للفَرْق بين الواقعية القياسية والواقعية البنيوية أهميةٌ كبيرة في هذا المقام أيضًا. فعندما يقول علماء الفيزياء إن نظريةً ما تقرِّب نظريةً أخرى، فإنهم عادةً ما يقصدون بذلك أن البنيةَ الرياضية للنظرية الأولى تبقى مُتحققة بشكلٍ تقريبيٍّ في النظرية الثانية. ولهذا إذا كان البنيوي على صوابٍ في أن النظرية تُقدَّم بالكامل من خلال بنيتها الرياضية، فلن يكون من الصعب للغاية أن نرى كيف أنَّ النظرية القديمة يمكن أن تظلَّ صحيحةً

بدرجةٍ تقريبية، على الرغم من أفضلية النظرية الجديدة. (فمعادلات تدفُّق الحرارة لا تهتم بما إذا كان ما يتدفَّق مائعًا أم كميةً من الاهتزازات، ولمعادلات الضوء أيضًا البنيةُ نفسها تقريبًا، في كلٍّ من نظرية الأثير ونظرية الموجات الكهرومغناطيسية الحديثة.) أما أنصار الواقعية القياسية، فيواجهون تحديًا أصعبَ.

بهذا تنتهي جولتنا القصيرةُ في الفلسفة العامة للعلوم. وفيما يلي النقاطُ الرئيسية التي سيتكرَّر ذكرُها في هذا الكتاب:

- التكذيب: يعدُّ تحسنًا كبيرًا على الاستقراء باعتباره وصفًا للمنهج العلمي، لكنه لا يزال تقريبًا ليس إلا؛ فعادةً ما تكذِّب ملاحظةٌ معيَّنة نظريةً ما في ظل مجموعة من الافتراضات الأساسية. وبناءً على هذا، لا يوجد اختبارٌ واحد مباشر يحدِّد متى يكون الشيء علميًّا، بل علينا أن ننظر إلى أيِّ مدًى يتقدَّم برنامجُ البحث العلمي أو يتأخر.
- نقص الأدلة: حينما تطرح نظريتان مختلفتان التنبؤاتِ نفسَها، وهي مسألة نادرًا ما تتسم بالتطرف؛ لأن الفَرْق بين المزاعم النظرية والرصدية ضبابي. وغالبًا ما تسوَّى الحالات الجلية من نقص الأدلة بمرور الوقت، حينما يتبيَّن أن إحدى النظريتَين أكثرُ فعالية كإطار. ويبدو أن الحالاتِ الواقعيةَ الوحيدة من نَقْص الأدلة لا تحدُث إلا حين توجد نظريتان متكافئتان رياضيًّا؛ في هذه الحالات، يعتبرهما علماء الفيزياء — وبعض فلاسفة الفيزياء وليس كلهم — نظريةً واحدة.
- مذهب الذرائعية: يحظى مذهب الذرائعية (وهو وجهة النظر القائلة بأن النظرية العلمية ليسَت سوى تنبؤاتها التجريبية) بالرفض على نطاقٍ واسع في فلسفة العلوم؛ ذلك أنه يعتمد على التمييزِ الحادِّ بين الأجزاء التجريبية من النظرية، والأجزاء النظرية منها التي لا تدعمها الممارسات العلمية. فنحن نجد أنَّ موقف «الواقعية العلمية» السائد في العلم والفلسفة، يتمثَّل في التعامل مع النظريات العلمية حرفيًّا، باعتبارها محاولاتٍ لوصفِ ما يحدُث بالفعل في نظامٍ ما، حتى عندما تكون بعض أجزاء هذا الوصف غيرَ مرئية للعين المجرَّدة.

في الفصل الثاني، سأبدأ بمناقشةِ فلسفة الفيزياء البحتة، بدءًا من فلسفة المكان والزمان والحركة.

الفصل الثاني

الحركة والقصور الذاتي

لِنَعُد بذهننا إلى القرن السابع عشر؛ مهدِ الفيزياء الحديثة التي أخرجها إلى النور رينيه ديكارت، وجوتفريد لايبنيتس، وجاليليو جاليلي، ويأتي مِن قبلهم إسحاق نيوتن بالطبع. لم يكن ثمَّة فرقٌ حقيقي آنذاك يفصِل بين الفلسفة والعلوم؛ إذ كانت الفلسفة الطبيعية تعني «العلوم» فحسب، على الرغم من ذلك، قد يندهش القارئ المعاصر حينما يدرك مدى هوس المفكِّرين بسؤالٍ فلسفيٍّ الجوهر ألا وهو: «ما المقصود بحركة الجسم؟». في هذا الفصل، سنرى كيف أنه لا يمكن ممارسةُ الفيزياء من دون تقديم إجابةٍ عن هذا السؤال، وكيف أن محاولةَ الإجابة عنه تعرِّفنا بحقائقَ عميقةٍ عن طبيعة المكان والزمان. وفي الفصل الثالث، سنرى أن هذه الحقائق قد تغيَّرت بفعل فيزياء القرن العشرين، لكنها لم تتغيَّر تمامًا؛ ومن ثَم فإن العديد من أعمقِ المبادئ في فيزياء اليوم لا يزال يرتكز على رؤًى يمكن تعلُّمها من فيزياء القرن السابع عشر.

السكون والحركة

فيما يلي طرحٌ أساسي لفيزياء نيوتن التي يتعلَّمها كلُّ طالب:

> **قانون نيوتن الأول (الصيغة المبسَّطة):** يبقى الجسم الساكن ساكنًا ما لم تؤثِّر فيه قوةٌ خارجية، ويبقى الجسم المتحرِّك متحركًا بالسرعة نفسها وبالاتجاه نفسه، ما لم تؤثِّر فيه قوة خارجية.

لكن ما المقصود فعليًّا بمصطلحَي «السكون» و«الحركة» في هذا السياق؟ الإجابة المباشرة هي «الحركة النسبية»: بمعنى أن الجسيم «أ» يكون في حالة سكون «بالنسبة إلى

الجسيم «ب»» إذا كانت المسافة بين الجسيمَين «أ» و«ب» ثابتة. وسوف نفصِّل هذه المعلومةَ ونوضح أوجهَ الاستفادة منها؛ إذا كان هناك جسمٌ ممتد، مثل الأرض، فإن الحركات النسبية إلى ذلك الجسم تعطي وصفًا مفصلًا لحركةِ أحد الجسيمات. يمكننا القول مثلًا عن أحد الجسيمات إنه يوجد على ارتفاع ٣١٠٠ متر من سطح الأرض، ويقع عند دائرة عَرْض ٣٤,٠٥٢٢ درجة شمالًا وخط طول ١١٨,٢٤٣٧ درجة غربًا، وإذا عرفنا مدى السرعة التي تتغيَّر بها تلك الأرقام، فإننا سنعرف السرعةَ التي يتحرَّك بها الجسيم بالنسبة إلى الأرض في اتجاه الشمال/الجنوب، والغرب/الشرق، والأعلى/الأسفل. بهذه الطريقة، تحدِّد الأرض «إطارًا مرجعيًّا ماديًّا» يمكن استخدامه ليكون مقياسًا للحركة.

على الرغم من ذلك، فالحركة النسبية — حتى الحركة النسبية إلى إطار مرجعي مادي — لا يمكن أن تكون هي ما يُقصَد بـ «الحركة» في قانون نيوتن الأول. فربما يكون الجسم «أ» متحركًا بالنسبة إلى الجسم «ب»، لكنه ساكن بالنسبة إلى الجسم «ج»؛ ومن ثمَّ فإنَّ تحديدَ ما إذا كان الجسم في حالة سكونٍ نسبي أم في حالة حركةٍ نسبيةٍ؛ لا يجري لكل جسمٍ على حدة. لكن القانون الأول يتحدَّث عن الحركة فحسب، لا يتحدَّث عن «الحركة بالنسبة إلى هذا الجسم أو ذاك». (أطلق نيوتن نفسُه على هذه الحالة «الحركة المطلَقة» أو «الحركة الحقيقية»). وبالمثل، ينصُّ قانون نيوتن الثاني على أن تسارُع الجسم يتناسب مع القوة المؤثِّرة فيه، والتسارع — معدَّل التغيُّر في السرعة المتجهة — هو أيضًا مطلَق، لكن القانون لا يذكر شيئًا عن أيِّ جسم آخرَ يتناسب معه.

(تذكِرة سريعة: «السرعة المتجهة» هي السرعة زائد الاتجاه. إذا كنتَ تقود سيارة بسرعة ٣٠ ميلًا في الثانية، وانعطفت جهة اليسار من دون إبطاء السرعة، فهذا معناه أنَّ سرعتك المتجهة قد تغيَّرت وإن لم تتغيَّر السرعة نفسها.)

يمكننا النظرُ إلى المسألة بطريقةٍ أخرى، وذلك بالتساؤل عما إذا كانت قوانين نيوتن تنطبق على مقاييس أنواع الحركة في الإطار المرجعي المادي المتمثل في الأرض أم لا. وهذا سؤال تجريبي إجابته تجريبية وهي: كلَّا إلى حدٍّ كبير. لا تنطبق هذه القوانين في بعض الظروف لأن الأرض نفسَها غيرُ ساكنة؛ فهي تدور وتتعرَّض للزلازل وغيرها من الظواهر في بعض الأحيان. لكن حتى عند الحديث عن الأرض بصفتها جسمًا متحركًا، لا يمكننا استخدام الأرضِ نفسِها لتكون الجسم الذي تتحدَّد الحركة بالنسبة إليه.

ما الذي يمكن أن نستخدمه إذن؟ كثيرًا ما كان علماء الفلك يشيرون إلى «النجوم الثابتة»؛ فالنجوم تتحرَّك عَبْر سماء الليل بمرور الوقت، لكن الأرض هي ما يدور في

حقيقة الأمر على خلفيةٍ ثابتة من النجوم. والحق أنَّ استخدام النجوم باعتبارها إطارًا مرجعيًّا ماديًّا أفضلُ كثيرًا من استخدام الأرض. على الرغم من ذلك، فهو لا يزال حلًّا غيرَ مثالي لسببٍ مماثل؛ وهو أن النجوم ليست ثابتةً في نهاية المطاف (وكان نيوتن ومعاصروه يعرفون ذلك). تتحرَّك النجوم فيما بينها، وهي تدور جميعًا حول مركز المجرَّة، والمجرَّة نفسها تميل نحو جارتها.

ما من حلٍّ بسيطٍ لهذه المشكلة. إذا كنا نريد إطارًا مرجعيًّا ماديًّا يكفي لتحديد أنواع الحركة طبقًا لقوانين نيوتن، فلا بد من تحديده من منظور الأجسام التي لا تتحرَّك فيما بينها إطلاقًا؛ ربما ينبغي أن نسميه حينئذٍ «إطار السكون». غير أنه لا وجود لمثل هذه الأجسام.

نيوتن نفسه كان يعتقد — ويُحاجُّ بقوة — أن الطريقة الوحيدة لتعريف «الحركة» على النحو الملائم، هي إدخال شيءٍ آخر إلى صورتنا عن العالم؛ شيء إضافي إلى كل المادة المتحرِّكة، شيء سيبقى وإن تلاشت المادة وأسماه: «المكان المطلق». كان مفهوم نيوتن للمكان المطلق لاهوتيًّا إلى حدٍّ كبير، حتى إنه أشار إليه بأنه «مركز الإحساس لدى الإله»، لكن الحجة العلمية لهذا المفهوم يمكن أن تُطرح دون أي تطرُّق للاهوت على الإطلاق: إنه الشيء الذي يحدِّد إطار السكون، وهو المعيار المرجعي غير المتغير الذي يمكن تحديد أنواع الحركة بناءً عليه.

يطلِق الفلاسفة على فكرة اعتبار المكان شيئًا منفصلًا عن المادة نظريةَ الجوهرية، وهي تتناقض مع نظرية «العلائقية» التي ترى أن كلَّ ما يوجد في الكون هو المادة. يعتقد مؤيدو نظرية الجوهرية أن المكان عبارة عن جوهر، وهو في حد ذاته أسمَى من المكوِّنات المادية في العالم؛ أما أنصار مبدأ العلائقية، فيرون أنَّ «المكان» ليس سوى وسيلةٍ للتحدُّث عن العلاقات القائمة بين الأجسام. قد يبدو هذا الجدال من نوع الجدالات الباطنية الغامضة أو حتى الدلالية، لكنَّ حججَ نيوتن تبيِّن أهميته للفيزياء؛ ذلك أنه إذا كان كلُّ ما هو موجود عبارة عن مادة، فيبدو أنه لا توجد أيُّ طريقة لتحديد إطار السكون الذي نحتاجه للفيزياء.

يختلف الفلاسفة مع بعضهم البعض (يا للصدمة!) بشأنِ ما إذا كان المكان المطلق ضروريًّا؛ لكي تصبح فكرةُ وجود إطار سكونٍ مرجعي منطقية أم لا، لكن طبيعة إطار السكون ليست هي ما يهمنا حقًّا في هذا النقاش، وإنما حقيقة أن الفيزياء تبدو بحاجة إلى ذلك الإطار، وحقيقة أنه يوفِّر «مرجعًا» تتطوَّر الفيزياء على خلفيته. فليس للإطار في حد ذاته دور في ديناميكيات الفيزياء — إنه موجود فحسب — لكنه يوفِّر معاييرَ القياس

التي يمكن أن تعرِّف ديناميكيات الأجسام المادية، التي تخضع لقوانين الفيزياء الموجودة في الصدارة. من منظورٍ فلسفيٍّ بحتٍ، لم يكن من الضروري للفيزياء أن تكون على هذا النحو؛ فيمكننا أن نتخيَّل الفيزياء وقد صيغَت بالكامل وفقًا للمسافات النسبية وتغيُّراتها؛ الواقع أنَّ مثل هذه الفيزياء قد وجدت بالفعل، لكنَّ المرجع يبدو ضروريًّا لوصف الفيزياء الفعلية للأنظمة — التي تمنَّى نيوتن أن يدرُسها — وصفًا صحيحًا.

مبدأ النسبية

على الرغم مما سبق، فثمَّة شيءٌ غريبٌ قليلًا في استخدام نسبية الحركة إلى إطار سكون مطلَق، باعتبارها أساسَ علم الميكانيكا بدلًا من استخدام نسبية الحركة إلى أجسام مادية أخرى. فنحن نستطيع رؤيةَ الأجسام المادية على الرغم من كل شيء؛ ومن ثمَّ يمكننا أن نرى ما إن كان يوجد شيءٌ يتحرَّك بالنسبة إليها أم لا. أما إطار السكون، فلا يمكننا أن نراه. (وفقًا لنيوتن، فإن نقاط المكان المطلَق غير مرئية). فيبدو أنَّ استخدام إطارٍ مرجعي غير متحرك وغير مادي لـ «تعريف» الحركة؛ لا يجدي نفعًا ما دمنا لا نستطيع «الكشف عن» الحركة.

كان نيوتن نفسه مدركًا لهذه المشكلة؛ فقد ورد في كتابه «المبادئ الرياضية»، ما يلي:

> إنه لأمرٌ في غاية الصعوبة بالفعل أن يكتشف المرءُ الحركاتِ الحقيقيةَ لأجسامٍ معينة، ويميِّزها بفاعليةٍ عن الحركات الظاهرة [أي الحركات النسبية]؛ لأن أجزاء ذلك الفضاء الثابت — الذي تجري فيه تلك الحركات — لا ترصدها حواسُّنا بأي حالٍ من الأحوال. غير أنه ليس بالأمر المحال تمامًا …

يواصل نيوتن طَرْحه ويقترح تجربةً فكريةً عبقرية: كرتَين ثقيلتَين تربط بينهما سلسلة. لا تخبرنا الحركاتُ النسبية بما إذا كان التركيب بأكمله في حالة سكون، أم في حالة دوران بسرعة عالية؛ ففي الحالتَين كلتَيهما، لا تتغير المسافةُ بين الكرتَين. على الرغم من ذلك، فوفقًا لنظرية نيوتن نفسها، ستزداد درجة الشد في السلسلة إذا كانت الكرتان يدور كلٌّ منهما حول الأخرى. وبالفعل، إذا كانت السلسلة في حالةِ شد، يمكننا أن نرى ما إذا كان دَفْع الكرتَين بطرقٍ مختلفةٍ يزيد من الشد أم يقلِّل منه، وحينئذٍ سنتمكن من معرفةِ ما إذا كانت الكرتان في حالة دوران أم لا، ومعرفة سرعة الدوران، وسنتمكن علاوةً على ذلك من معرفة محور الدوران.

توضح هذه التجربةُ الفكرية إحدى الفِكَر العامة التي تناولناها في الفصل الأول؛ وهي أن الملاحظات الرصدية العلمية محمَّلة بالنظرية؛ ومن ثَم فإن تحديدَ ما يمكن رصدُه وقياسه في نظريةٍ ما، أو ما لا يمكن رصدُه وقياسه، ليس بالأمر السهل، بل يتوقَّف على تفاصيل النظرية نفسها. ففي ميكانيكا نيوتن، يمكن رصدُ الدوران المطلَق — وإن كانت الحواس لا تدركه مباشرةً — عَبْر علاقته الديناميكية بالأشياء التي تُقاس بشكل مباشر بدرجة أكبر.

هل يمكن إذن الكشف عن كلِّ الحركات؟ كلا؛ لنتناول الفقرة التالية الشهيرة المقتبَسة من جاليليو:

> احبس نفَسَك مع صديق في المقصورة الرئيسية السفلية في سفينة كبيرة، وخُذ معك بعضَ الذباب والفراشات وغيرها من الحشرات الطائرة. وخُذ معك أيضًا دلو ماء كبيرًا به بعض الأسماك، وعلِّق زجاجةً تفرغ محتوياتها قطرة بقطرة في وعاء واسع أسفل منها. وحينما تكون السفينة ساكنة، لاحظ بعناية كيف أنَّ الحشرات الصغيرة تطير بسرعة متساوية نحو جميع جوانب المقصورة. لاحظ أيضًا أنَّ السمك يسبح في كل الاتجاهات سواء، وأنَّ القطرات تسقط في الوعاء من تحتها؛ وحينما ترمي شيئًا إلى صديقك، فإنك لا تحتاج إلى أن ترميَه بقوةٍ تزيد شدتُها في أحد الاتجاهات دون الآخر؛ إذ المسافات متساوية؛ وحينما تقفز بكلتا قدميك، فإنك تقطع مسافاتٍ متساوية في كل اتجاه. بعد أن تكون لاحظت هذه الأشياء ورصدتها بعناية (لكن لا شكَّ أنه في حالة سكون السفينة، سيحدث كل شيء على هذا النحو)، اجعل السفينة تتقدَّم بأي سرعة ترغب فيها على أن تكون حركتها ثابتة، ولا تتأرجح في هذا الطريق أو ذاك. وستكتشف حينذاك أنه لم يحدُث أدنى تغيير في كل التأثيرات المذكورة، ولن تستطيع أن تعرف من أيٍّ منها ما إذا كانت السفينة تتحرك أم تقف ساكنة.

تتمثَّل وجهة نظر جاليليو في أنه لا يمكن الكشف عن السرعة المتَّجهة المطلَقة لنظامٍ من الأجسام، بأي وسيلةٍ متاحةٍ لعالِم يكون جزءًا من هذا النظام بعينه؛ لأن الحركات النسبية للأجسام لا تتأثَّر بسرعتها المتجهة الكلية. ولا يمكن الكشف عن الحركة إلا بربط الأجسام بنظام خارجي (ومن ثمَّ جاءت تعليمات جاليليو بأن يكون العالِم تحت سطح السفينة وليس فوق السطح، حتى لا يرى البحر المتحرك).

هل هذا صحيح؟ من المؤكَّد أن الأمر يبدو بديهيًّا (لا سيما في العصر الحديث: عصر السفر بالطائرات؛ أنا نفسي نسيتُ أكثرَ من مرة ما إذا كانت الطائرة التي أستقلُّها قد أقلعت أم لا؛ إذ إنَّ الفرق في السرعة المتجهة المطلقة يساوي ٣٠٠ متر في الثانية)، ولكن ألا يمكن أن يوجد تأثير خفي يمكن الكشف عنه بالقياسات ذات الدقة الكافية؟

طبقًا لميكانيكا نيوتن نفسها، فإنه لا يوجد. فحقيقة أنَّ الحركات النسبية بين مجموعة من الأجسام لا تتأثَّر، إذا أُعطيت جميع الأجسام السرعة المتجهة نفسها، هي نتيجة مشتقة من معادلات الميكانيكا. يُسمى ذلك بلغة الفيزياء «التناظر الديناميكي»، وهي عبارة عن تحوُّل في نظامٍ ما يخلُف الفيزياءَ التي تحكُم ذلك النظام من دون تغيير؛ ومن ثَم لا يمكن للعمليات الفيزيائية الموجودة داخل النظام الكشفُ عنه. ويتوقف ما إذا كان ثمَّة تحوُّل معيَّن يُعَد تناظرًا مع أحد الأنظمة على النظرية التي تصِف ذلك النظام وصفًا صحيحًا؛ ومن ثَم فإن المسألة في النهاية مرهونةٌ بالتجربة، لكن حين يتعلَّق الأمر بنظرية محدَّدة، فإنَّ حالات التناظر معها تكون من الحقائق الرياضية المعروفة. وفي حالة فيزياء نيوتن، فإن الزيادة في السرعة المتجهة — التحولات التي تزيد فيها سرعة كل الأجسام بالمقدار نفسه وفي الاتجاه نفسه — هي حالات تناظُر يمكن إثباتها. يتضح من هذا إذن أنَّ جاليليو محق: لا يمكن اكتشاف الزيادة في السرعة المتَّجهة في ميكانيكا نيوتن.

يُطلَق على الافتراض القائل بأن حالات الزيادة في السرعة المتجهة تمثِّل حالات تناظر اسم «مبدأ النسبية». وصحيحٌ أنَّ المصطلح يرتبط في الثقافة العامة بألبرت أينشتاين، لكن الفكرة الأساسية وُلدت من قَبْله بمئات السنين. وربما يمثِّل هذا المبدأ مشكلةً كبيرة لفيزياء نيوتن؛ إذ ينصُّ المبدأ على أنه من المستحيل تمامًا، ووفقًا لقوانين الفيزياء نفسها، أن نكتشف إن كان أحدُ الأجسام يتحرَّك أم لا بالنسبة إلى إطار السكون، ويأتي ذلك على خلافِ ما طرحه نيوتن.

الأُطر المرجعية القصورية

«يبدو» أننا قد اتفقنا حتى الآن على ما يلي:

(١) نحتاج إلى طرحِ فكرة المكان المطلَق لتوفير «إطار سكون» يمكن تعريف الحركات المستخدَمة في قوانين نيوتن بالنسبة إليه (أو نحن نحتاج إلى إطار السكون نفسه على أي حال، ولا يمكن الاستغناء عنه بأي إطار تحدِّده بعض الأجسام المادية).

(٢) يستحيل اكتشافُ ما إذا كان الجسم في حالة سكون أم في حالة حركة منتظمة.

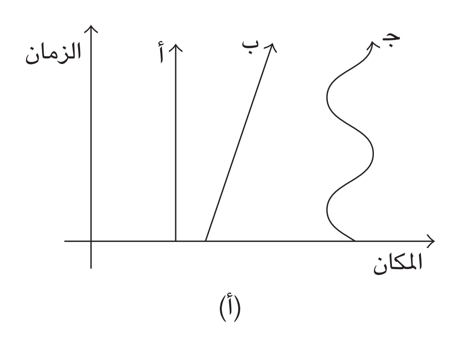
تبدو العبارتان السابقتان متناقضتَين. ذلك أنه إذا لم يكن بإمكاننا اكتشافُ الحركة بالنسبة إلى المكان المطلَق، حتى ولو بطريقةٍ غير مباشرة، فكيف تكون هذه الفكرة ضرورية للفيزياء؟ لكي ندركَ أنه لا يوجد تناقض حقيقي، سنعرِّف الإطارَ المرجعي القصوري (أو لنسمِّه الإطار القصوري اختصارًا) بأنه أيُّ إطار مرجعي يتحرك بسرعةٍ متجهةٍ ثابتةٍ قياسًا بإطار السكون؛ أي بالمكان المطلَق وفقًا لنيوتن. أو الأجسام الساكنة بالنسبة إلى إطار قصوري تتحرَّك بالقصور الذاتي — بمعنى أنها تتحرك في خط مستقيم وبسرعة ثابتة — طبقًا لإطار السكون وطبقًا إلى أي إطار قصوري آخرَ بالطبع.

والآن، يتمثَّل مبدأ النسبية في أنه يمكن ممارسة الفيزياء، باستخدام معيار الحركة الذي يحدِّده أيُّ إطارٍ قصوري، ولا يلزم أن يكون ذلك الإطار هو إطار السكون. ويمكننا بالفعل أن نرى هذا (بدرجةٍ كبيرة) بمجرد النظر في قوانين نيوتن؛ إذ ينص القانون الأول على أن الجسم الساكن يبقى ساكنًا ما لم تؤثِّر فيه قوةٌ ما، والجسم المتحرك يبقى متحركًا بسرعةٍ متجهة ثابتة ما لم تؤثِّر فيه قوةٌ ما، لكن إذا تحرك الجسم بالنسبة إلى إطار قصوري، فإنه يتحرك بالنسبة إلى جميع الأُطر القصورية. ويربط القانون الثاني بين التسارع والقوة، لكن لأن التسارع هو «معدَّل التغيير» في الحركة، فإن تسارع الجسم لا يتغيَّر في أي إطارٍ قصوري.

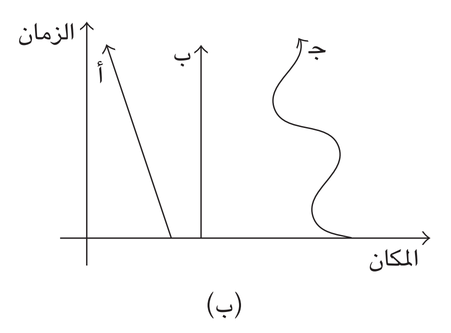
ما نحتاج إليه إذن لممارسة الفيزياء هو إطار قصوري بشكلٍ أو بآخر. وبناءً على أحد هذه الأُطر، يمكننا إنشاء عددٍ لا حصر له من هذه الأُطر، لكننا لا نحتاج إلى معرفة أي من هذه الأطر هو إطار السكون، ونحن لا نستطيع أن نعرف ذلك بالفعل؛ بسبب مبدأ النسبية.

لنرجعِ الآن إلى أحجيةِ كيفيةِ اكتشاف الحركة المطلَقة (بما أننا لا نستطيع رؤيةَ الأطر القصورية أكثرَ مما يمكننا رؤية المكان المطلق). يوضح المثال الذي ضربه نيوتن بالكُرَتَين أننا نستطيع تحديدَ ما إذا كان أحد الأجسام يدور أم لا، بالنظر إلى درجاتِ الشد الداخلي به. (لاحظ أن الدوران لا يتأثَّر بتغيُّرات السرعة المتَّجهة المطلَقة؛ ومن ثمَّ إذا كان الجسم يدور بالنسبة إلى إطارٍ قصوري، فإنه يدور بالنسبة إلى جميع الأطر القصورية). وهذه الطريقة لا تصلح إلا لأننا نفترض ميكانيكا نيوتن مسبقًا، بمعنى أننا لا نعرف أنه يوجد شدٌّ في السلسلة إلا لأن النظرية تخبرنا بأنه سيوجد شدٌّ في السلسلة. يتمثَّل المبدأ العام فيما يلي: سنتوصَّل إلى الحركات المطلَقة من خلال النظر إلى الحركات النسبية، ثم نسأل أنفسنا ما يلي: ما الذي يجب أن تكون عليه حركةُ إطارٍ قصوري بالنسبة إلى كل هذه

الأجسام، بما يجعل حركاتها النسبية إلى ذلك الإطار تتطابق مع قوانين نيوتن؟ نعرف أن العملية لن تعطينا إطارًا قصوريًّا محددًا بسبب مبدأ النسبية، لكننا نرجو مع توفُّر نظامٍ معقَّد بما يكفي أن تعطينا العملية خيارًا محددًا يشمل «مجموعةً من حالات زيادة السرعة المتجهة المنتظمة»؛ أو بعبارةٍ أخرى تعطينا مجموعة الأطر القصورية بأكملها، وإن لم تحدِّد إطارًا واحدًا كما كنا سنفضِّل.



(أ)



(ب)

شكل ٢-١: الحركة في إطارَين قصوريَّين: (أ) الحركة في الإطار القصوري للجسيم «أ»؛ (ب) الحركة في الإطار القصوري للجسيم «ب».

يصوِّر الشكل ٢-١ هذه العملية. ففي الجزء (أ) من الشكل ٢-١، تظهر حركات الجسيمات الثلاثة «أ» و«ب» و«ج» بالنسبة إلى إطار قصوري؛ حيث الجسيم «أ» في حالة سكون، بينما يتحرَّك الجسيم «ب» في خطٍّ مستقيم وبسرعة ثابتة، ويتأرجح الجسيم «ج» من جانب إلى آخر، ولكنه لا ينتقل بشكل منهجي إلى أي مكان. وفي الجزء (ب) من

الشكل ٢-١، نرى إعادة تصوير للموقف نفسه في إطار قصوري، حيث الجسيم «ب» في حالة سكون، والجسيم «أ» هو الذي يتحرك في خط مستقيم وبسرعة ثابتة، بينما يستمر الجسيم «ج» في التأرجح، لكنه ينجرف الآن جهة اليسار. يختلف الإطاران القصوريان في أي الجسيمات هو الساكن وأيها المتحرك، لكنهما يتفقان أن الجسيم «أ» والجسيم «ب» يتحركان تحركًا قصوريًّا دون الجسيم «ج».

ومن هذا المنطلق، يمكننا إعادةُ صياغة قانون نيوتن الأول على النحو التالي:

قانون نيوتن الأول (نسخة المكان المطلَق): يتحرك الجسم في خط مستقيم وبسرعة ثابتة بالنسبة إلى أي إطار مرجعي قصوري ما لم تؤثِّر عليه قوةٌ ما.

مفهوم الزمكان

لا تشير الصيغةُ الجديدة لقانون نيوتن إلى «المكان المطلَق» ولا إلى أي «إطار ساكن»، مما قد يغري بالاعتقاد بأننا نستطيع التوقُّف عن الحديث عن الفضاء المطلَق تمامًا. لكنَّ علينا أن نتوخى الحذر. لعلك تتذكَّر تعريف الإطار القصوري: إنه إطار يتحرَّك بسرعة ثابتة «بالنسبة إلى» المكان المطلق. وإذا اقتطعنا المكان المطلق من النظرية، فسيبدو أننا فقدنا القدرة على تحديد «ماهية» الإطار القصوري.

لا يسعنا سوى قبول أن المكان المطلق مفهومٌ ضروري للنظرية، على الرغم من أنه لا يمكن رصدُه (ولو بطريقةٍ غير مباشرة). وبلغة الفصل الأول، ستكون هذه المسألة حالةً من حالات نقص الإثبات (ليس للنظرية الصحيحة، بل لإحدى حقائق الكون). يرى معظم الفلاسفة أن هذه المسألة تمثِّل احتماليةً متماسكة، لكنهم لا يطمئنون إليها، أما علماء الفيزياء، فهم أكثرُ تشككًا فيها من الفلاسفة. ثمة ضغط قوي على الأقل لإيجاد طريقة للتفكير بشأن النظرية التي تزيل حالةَ نقص الإثبات.

لمعرفة الكيفية التي قد تؤدي إلى تحقيقِ ذلك، ينبغي أن نتذكَّر فكرةَ المكان المطلَق باعتبارها أساسًا للفيزياء؛ شيء لا يخضع للقوانين الديناميكية نفسها وإنما يحدِّد المفاهيم التي تتطلبها تلك القوانين. يوفِّر المكان المطلَق فكرتَين منفصلتَين من «البنية الأساسية» اللازمة للفيزياء:

(١) **«الهندسة المكانية»**: يوفِّر المكان المطلَق المقياسَ الذي يحدِّد المسافة بين جسمَين (ويسميه علماء الرياضيات «القياس»). يطلَق على هذه البنية «الهندسة الإقليدية» كما

يسمِّيها المختصون في الهندسة؛ وحتى زمن أينشتاين على الأقل، ظلَّت الهندسة المكانية تُطرَح دون أي إشارةٍ إلى ضرورة أن يكون لها أي ديناميكياتٍ خاصَّةٍ بها.

(٢) «**بنية إطار السكون**»: يوفِّر المكان المطلَق تعريفًا للسكون والحركة، مما يكفي لتحديد السرعة المتجهة المطلَقة لأي جسم.

ثمَّة بنية ثالثة ضرورية يوفِّرها الزمان المطلق، وهو أيضًا أحدُ المفاهيم الأساسية (وفقًا لنيوتن):

(٣) «**المقياس الزمني**»: يحدِّد الزمان المطلق الزمن المنقضي بين أي حدثَين.

ما يخبرنا به مبدأ النسبية أننا لا نحتاج إلى «كل» هذا القَدْر من البنى. يخبرنا أننا نحتاج إلى الهندسة المكانية، وإلى المقياس الزمني، وإلى «بعض» من بنيةِ إطار السكون، لكننا لا نحتاج من هذا إلا ما يكفينا لأنْ نعرف مقدار تسارُع الأجسام (ومعرفة الأجسام التي لا تتسارع)؛ أي إننا لا نحتاج إلى معرفة الفرق الكامل بين السكون والحركة.

لدى علماء الفيزياء طريقةٌ أنيقة للتفكير بشأن هذه البنى المتنوِّعة، متمثلة في مصطلح «الزمكان». (لم يُصَك مصطلح «الزمكان» حتى القرن العشرين، وقد ورد في شرح عالِم الرياضيات هيرمان منكوفسكي لفيزياء أينشتاين، لكن المفهوم نفسَه ينطبق تمامًا على ميكانيكا نيوتن). من المنظور الرياضي، ليس الزمكان سوى دمجٍ للمكان والزمان في شيء واحد؛ فإذا تطابقت كل نقطة في المكان مع «الموقع» الذي قد يوجد فيه شيءٌ ما، وتطابقت كل نقطة في الزمان مع «الوقت» الذي قد يحدُث فيه شيءٌ ما، فإن ثمَّة نقطة في الزمكان تتطابق مع كلَيهما في آنٍ واحد. وبناءً على هذا، فإنَّ الزمكان رباعي الأبعاد؛ فنحن نحتاج إلى ثلاثة أرقام لمعرفة موقع شيءٍ ما في المكان (المسافة التي يبعُدها عن نقطة مرجعية في كل اتجاه من الاتجاهات الثلاثة) ورقمٍ واحد لمعرفة وقت الشيء في الزمان (أي وقت حدوث الشيء بالنسبة إلى لحظةٍ مرجعية مثل السنة «صفر» بالتقويم الميلادي)؛ ومن ثمَّ نحتاج إلى أربعة أرقامٍ لمعرفة المكان والزمان كلَيهما، وما يعنيه جميع علماء الرياضيات بمصطلح «مكان رباعي الأبعاد» هو مجموعة من الأشياء المعنونة (بطريقة سلسة مناسبة) بأربعة أرقام.

لست مضطرًّا إلى تخيُّل الأشياء «في أربعة أبعاد» لاستخدام مفهوم الزمكان. حقيقةُ الأمر — وذلك أحد أسرار المهنة — أنه ما من أحدٍ تقريبًا، ولا حتى المحترفين من علماء الفيزياء والرياضيات، يضع في اعتباره الأبعادَ الأربعة، بل يفترضون أنَّ المكان ثنائي أو ثلاثي الأبعاد، ويثقون بأن تُعرِّفهم الرياضيات حين لا يعود هذا الافتراض صالحًا. لِنجرب

هذه الخدعة الآن؛ افترض أنَّ الفضاء لا يتكون إلا من بُعدَين فحسب، تخيَّله وكأنه ورقة عريضة. ولأنك لا تستطيع أن ترى الفضاء في الحقيقة، فلنتصوره وكأنه رُقاقة من مادة الأكريليك عريضة ورقيقة. وللوصول إلى تصوُّر الزمكان، تخيَّل أنك تكدِّس العديد (عدد لا نهائي بالمعنى الحرفي) من الرقاقات فوق بعضها؛ هذه الكومة اللانهائية من رقاقات المكان هي الزمكان. وتخيَّل أنك تأخذ إبرة رفيعة وتغرزها في الكومة من الأسفل إلى الأعلى، حتى تثقب كل رقاقة تلو الأخرى، ويمكن اعتبار المسار الذي اتخذته الإبرة بمثابة مسار أحد الجسيمات، وفي كل مرة، فإن الثقب في الرقاقة في ذلك الزمن يمثل مكان وجود الجسيم في ذلك الزمن.

يمكننا الآن تخيُّل الأجزاء المختلفة من البنية الأساسية التي ناقشناها للتو، على أنها أجزاءٌ مختلفةٌ من بنية الزمكان. تخبرنا الهندسة المكانية بهندسة كل نسخة من نسخ المكان؛ أي كل من رقاقات الأكريليك في نموذجنا التخيُّلي. وعند تحديد نقطتَين على الرقاقة نفسها، تعرِّفنا الهندسة المكانية بالمسافة التي تفصل بينهما. ويعرفنا المقياس الزمني بالفاصل في الزمن بين أي نسختَين مختلفتَين من المكان.

ماذا عن بنية إطار السكون؟ يمكن اعتبار أنه يخبرنا بكيفية تطوُّر نقاط المكان المطلَق نفسها في الزمن. عند تحديد نقطتَين في الزمكان — نقطتَين في نسختَين مختلفتَين من المكان — فهما إما تمثِّلان «النقطة نفسها» في المكان المطلَق، أو تمثلان نقطتَين مختلفتَين. وهذا يتيح لنا تحديدَ أي مسارات الجسيم — المسارات المتَّخذة عَبْر الزمكان — يمثِّل حركة قصورية، وأيها يمثل حركة متسارعة. يمكنك أن تتخيَّل هذه المسارات باعتبارها مجموعةً خاصةً مفضَّلة من المسارات عَبْر الزمكان، وكلٌّ منها يمثِّل جسيمًا في حالة السكون. وهذه البنية بكاملها — الزمكان والهندسة المكانية والمقياس الزمني وبنية إطار السكون — تُسمى في الاصطلاح الدارج لفلسفة الفيزياء «زمكانَ نيوتن».

على الرغم من ذلك، فممارسة الفيزياء لا تستلزم بنيةَ إطار السكون، بل البنية «القصورية» فحسب، ونحن نستطيع تمثيلها على الزمكان بعائلةٍ كاملةٍ من المجموعات الخاصَّة المفضَّلة من المسارات، بدلًا من مجموعة المسارات الواحدة التي حدَّدت بنيةَ إطار السكون. كلٌّ فرد من أفراد العائلة يختار إطارًا قصوريًّا واحدًا: أي مجموعة من الجسيمات التي تتحرك جميعها بسرعةٍ ثابتةٍ واحدة، لكننا لا نعتبر أيَّ إطارٍ من هذه الإطارات مفضلًا على البقية. ذلك أننا إن فعلنا ذلك يصبح الزمكان أقلَّ منهجيةً وتنظيمًا بعض الشيء؛ ويسمَّى الجسم الناتج ب «زمكان جاليليو»، تكريمًا لاكتشاف جاليليو لمبدأ النسبية.

هل يوفِّر الزمكان تفسيرًا؟

كانت الحجة العلمية التي طرحها نيوتن بشأن المكان المطلَق هي أنه ضروري لتعريف الحركة. ومن هذا المنطلق، قد يبدو الزمكان تعديلًا لطيفًا على الرؤية الجوهرية التي طرحها نيوتن؛ فعند إعادة النظر، يبدو أنَّ طرح فكرة وجود «مكان» فيزيائي دائم ينطوي على الإفراط؛ لأنه يعطينا فكرةً غير ضرورية تسمَّى السكون المطلَق، لكنَّ طَرْح الزمكان (بمفهوم جاليليو) هو المطلوب تمامًا كي تتسلح الفيزياء بالأساس الذي تحتاج إليه. ووفقًا لرؤية «جوهرية الزمكان»، لا يُعَد الزمكان محضَ بنية رياضية أو صورة مجردة، بل خلفية «مادية» تحل محلَّ مفهومَي المكان والزمان المنفصلين. وصحيحٌ أننا لا نستطيع الكشفَ عن الزمكان مباشرةً، لكنه مفهوم ضروري لفهم الفيزياء.

وعلى الرغم من أنَّ لهذا النهج مميزاتٍ كثيرة، فثمة شيء محيِّر بشأنه أيضًا. ففي الصورة التي يطرحها نيوتن، يُعَد مفهوم الحركة واضحًا بدرجةٍ ما على الأقل؛ فيكون الجسم متحركًا إذا كان يشغل نقاطًا مختلِفة من المكان في أزمنة مختلفة، ويكون ساكنًا إذا بقي في النقطة نفسها من المكان مع مرور الزمن. أما الصورة البديلة المتمثِّلة في الزمكان، فقد تخلَّصت من الفرق بين الحركة والسكون، وأبدلته بالفرق بين الحركة القصورية وغير القصورية؛ ثم نَصَّت على أنَّ الجسم يتحرك حركةً قصورية إذا اتضح من البنية القصورية للزمكان أنه يتخذ هذه الحركة.

لكن هذا الطرح يبدو دائريًّا «لا تكون الحركة قصورية إلا إذا كانت من الحركات المفضَّلة في البنية القصورية». فكيف لنا أن نفهم «ماهية» البنية القصورية إذا لم تكن — وفقًا للتعريف — القائمة التي تضم الحركات القصورية وغير القصورية؟ وإذا لم نستطِع فَهْمها إلا بهذا التعريف، أفلا يعني هذا أننا لا نزال غير متأكدين مما تعنيه «الحركة القصورية» فعليًّا؟

توجد طريقتان لمعالجة هذه الإشكالية. الطريقة الأولى هي التمسُّك بفكرة جوهرية الزمكان. سنأخذ باقةَ البنى التي يضمها الزمكان — الهندسة المكانية والمقياس الزمني والبنية القصورية — ونسميها «هندسة الزمكان». وسوف نتعامل مع هندسة الزمكان على أنها سِمة أولية من سمات العالم؛ ومن ثَم لا يمكن اختزالها إلى أيِّ حقائق عن الديناميكيات. وصحيحٌ أنَّ «البنية القصورية» تحدِّد بالفعل مجموعةً من المسارات في الزمكان، لكن تلك ليست سوى حقيقة أساسية وغير مفسَّرة عن العالم. وحينئذٍ نقول إنه «قانون جوهري في الفيزياء»، إنَّ الأجسام التي لا تؤثِّر فيها قوةٌ ما تتحرَّك بالفعل في

تلك المسارات. (وقد يُحتمل — من الناحية المفاهيمية — وجودُ عالَم تتحرك فيه الأجسام التي لا تؤثِّر عليها قوةٌ ما بطريقةٍ مختلِفة، لكن قوانين الفيزياء تخبرنا بأن عالمنا ليس كذلك). وفي هذا النهج الذي يتَّخذ «الهندسة أولًا» في بنية الزمكان، من الحقائق الجوهرية عن العالم أنه يضم هندسة الزمكان التي يضمها، وثمَّة حقيقة جوهرية منفصلة أخرى مُفادها أن الهندسة تتداخل مع الديناميكا مثلما يحدث بالفعل.

الأرجح أنَّ النَّهج الأول هو الموقف الذي يتبناه معظم الفلاسفة. على الرغم من ذلك، فنظرًا لما ينطوي عليه من فصلٍ منطقي بين الهندسة والديناميكا، فإنه يتركنا في حَيرة من أمرنا بشأنِ ما «نعنيه» حقًّا حينما نقول: «يضم الزمكان مثل هذه الهندسةِ أو تلك». سيكون علينا في نهاية المطاف أن نتعامل مع بعض المفاهيم على أنها مفاهيمُ أولية دون تحليل لها، وربما كان مفهوم هندسة الزمكان واحدًا من هذه المفاهيم. غير أنَّ لدينا نهجًا بديلًا يمكن أن نسميه «الديناميكا أولًا».

فالتعريف الذي يتبنَّاه نهج الديناميكا أولًا (وأعترف أنه أكثرُ ملائمة لأفكاري) أن «الأُطر القصورية» هي أُطر تتحرك فيها الأجسامُ التي لا تؤثِّر عليها قوةٌ ما حركةً قصورية. ومن هذا المنظور، فلا يوجد بالفعل أيُّ تحليل إضافي للإطارات يمكن تقديمه؛ فكلُّ ما في الأمر أنَّ قوانين الفيزياء تزعم أن الأجسام الحرة تتحرك في خطوطٍ مستقيمة، وبسرعةٍ ثابتةٍ بالنسبة إلى «بعض» الأطر، وهي تعرِّف تلك الأُطر بأنها الأطر القصورية.

يتبيَّن الفرق بين هذَين النهجَين جليًّا عندما نفكر في دور هندسة الزمكان. ففي نهج «الهندسة أولًا»، تفسِّر هندسة الزمكان العديدَ من الحقائق عن الديناميكا؛ لأن قوانين الفيزياء دائمًا ما تُصاغ بالنسبة إلى خلفيةٍ من الزمكان، وهندسة ذلك الزمكان تقيِّد ما قد تكون عليه تلك القوانين. أما في نهج «الديناميكا أولًا»، فإنَّ دور هندسة الزمكان يقتصر على «ترميز» تلك الحقائق الخاصة بالديناميكا؛ فالزمكان يضم تلك الهندسة التي يضمها بسبب قوانين الفيزياء، وليس العكس. ونتيجة لذلك، فمن المهم جدًّا لنهج الهندسة أولًا أن يكون الزمكان شيئًا ماديًّا؛ أما في نهج الديناميكا أولًا، فمن الطبيعي أن يُتخذ الزمكان باعتباره أداةً رياضية صورية (على الرغم من أنَّ مدى ضرورة ذلك للنهج أو حتى مدى منطقيته، مسألة خلافية).

أثمَّة شيء على المحكِّ في هذا الجدال؟ أرجو أن تكون الأسئلة محفِّزة للفكر في حد ذاتها؛ إذ إنها تتعلَّق بمسائلَ عميقةٍ عن بنية العالم، على الرغم من ذلك، فعلى مستوًى عمليٍّ بدرجة أكبر، تتضح أهميةُ تلك الأسئلة عندما نبدأ في دراسة الأدلة على أن البنية

القصورية للعالم ليست خلفيةً ثابتةً رغم كل شيء، بل إنها تتأثر — وتتحدَّد كذلك — بالمادة وديناميكياتها. وستكون تلك الأدلة وتداعياتها محورَ تركيزنا في الجزء الأخير من هذا الفصل.

القصور الذاتي والجاذبية

الفضاء الخارجي بيئةٌ «منعدمة الجاذبية»؛ فرواد الفضاء في المَركبات الفضائية لا يُسحبون نحو الأرضية، والأجسام التي يسقطونها أو يرمونها تتحرك في خطوط مستقيمة حتى تصطدم بشيء آخر، والحياة في الفضاء الخارجي غريبةٌ ومبهجة (إذا كنت تصدِّق مقاطع الفيديو التي تنشرها وكالة ناسا) أو غير مريحة على الإطلاق (إذا كنت تصدِّق ما يقوله رواد الفضاء عنها بعد أن يختبروها).

فلماذا تتسم هذه البيئةُ بانعدام الجاذبية؟ كثيرًا ما نسمع أن السبب في ذلك أنه لا توجد جاذبيةٌ في الفضاء (لأنه بعيد عن قوة جاذبية الأرض). لكنَّ هذا التفسير غير منطقي تمامًا. ذلك أنَّ نصف قطر الأرض يبلغ حوالي ٦٤٠٠ كيلومتر، وتدور محطة الفضاء الدولية على ارتفاع ٥٠٠ كيلومتر؛ وقوة جاذبية الأرض على مسافة ٦٩٠٠ كيلومتر ليست بأقل مما تكون عليه على مسافة ٦٤٠٠ كيلومتر إلا قليلًا للغاية. ثمَّة طريقة أفضلُ نستطيع أن نفهم بها السبب في أنَّ رواد الفضاء لا يشعرون بالجاذبية؛ وهو أن كل شيء في المَركبة الفضائية يتحرَّك بحرية في ظل وجود الجاذبية وبالسرعة نفسها: رواد الفضاء ومتعلقاتهم وجدران المَركبة الفضائية نفسها. ونتيجةً لهذا؛ فإنَّ الجاذبية تسحب رائد الفضاء بالفعل تجاه جدران المَركبة الفضائية فحسب، لكنها تسحب جدار المَركبة الفضائية بعيدًا عن رائد الفضاء أيضًا وبالدرجة نفسها. ولذا فإن الاسم الأفضل لانعدام الجاذبية هو: «السقوط الحر».

يُعَد هذا الاسم ملائمًا لأنَّ الجاذبية هي ما يسميه علماء الفيزياء بالقوة «الكونية»؛ ودرجة تسارع الأجسام التي تحفزها هذه القوة واحدة، بالنسبة إلى الأجسام الصغيرة والأجسام الكبيرة. (على خلاف القوة الكهربية على سبيل المثال؛ فالإلكترونات سالبة الشحنة ومن ثمَّ تجذبها القوة الكهربية التي تصدرها أجسامٌ كبيرة موجبة الشحنة، أما البروتونات فهي تتنافر بسبب شحنتها الموجبة. غير أننا لا نجد نظيرًا لهذه الحالة في الجاذبية، حيث إنه لا توجد مادة «مضادة للجاذبية» تنفر بفعل المجال المغناطيسي للأرض، ولا حتى مادة تتأثَّر به بدرجةٍ أقل قليلًا.)

على الرغم من ذلك، تشكِّل القوى الكونية لغزًا في فَهْمنا للقصور الذاتي. لنفترض أنك رائد فضاء في أول مهمة فضائية بين النجوم، لكنك تنام على الرغم من كلِّ هذه الأحداث المثيرة. وعندما تستيقظ، تجد نفسك معدومَ الوزن، إذن فقد غادرت المَركبة الفضائية سطحَ الأرض على الأقل، والمحرِّكات لا تعمل حاليًّا؛ ولكنك لا تعرف ما إذا كانت المَركبة (أ) ما تزال داخل مدار الأرض وجاهزة لإجراء محادثةٍ مع برج المراقبة؛ أم إنها (ب) في طريقها إلى قاعدة كوكب المشتري حيث سيمكنك التزوُّد بالوقود من جديد؛ أم إنها (ج) في الفضاء بين النجوم. من دون النظر إلى الخارج من النافذة أو سؤال شخص آخر، فلا توجد أمامك طريقة ممكنة لمعرفة ذلك؛ لأنك ستكون في سقوط حرٍّ في كلٍّ من هذه الحالات؛ ومن ثمَّ لا يمكنك إجراءُ أي تجربةٍ للكشف عن مجال الجاذبية.

يبدو هذا مألوفًا. فتلك هي البنية نفسها التي تتخذُها تجربة جاليليو الفكرية الخاصة بالسفينة؛ وكما أنه لا يمكن الكشف عن السرعة المتَّجهة الثابتة، لا يمكن أيضًا الكشف عن «قوى الجاذبية الخارجية» الموحَّدة. لكن لعلك تذكُر الدرسَ المستفادَ من تلك التجربة الفكرية: لما كنا لا نستطيع الكشفَ عن حالات الزيادة في السرعة المتَّجهة المطلَقة، فليس السكون المطلق بمفهوم ضروري لصياغة الفيزياء. وتتمثَّل الحجة المناظِرة في هذه الحالة فيما يلي: إذا كنا لا نستطيع اكتشافَ إن كان نظامٌ ما يتسارع على نحوٍ موحَّد أم لا، في ظل وجود مجال جاذبيةٍ خارجي أم لا، فلا حاجة إلى صياغة فيزياء ذلك النظام بما يسمح بالتمييز بين غياب مجال جاذبية خارجيٍّ وبين وجوده.

ما البديل إذن؟ يتمثَّل البديل فيما يلي: كما أن قوانين نيوتن لا تنطبِق على «إطار السكون» فحسب، وإنما على أي «إطار قصوري»، فإنها تنطبق أيضًا على أي إطار «يسقط سقوطًا حرًّا بفعل الجاذبية».

يُعدُّ هذا البديل تغييرًا جذريًّا بشأن كيفية عمل الحركة القصورية في الفيزياء. فهو يعني أولًا أن القوة الكونية — مثل الجاذبية — ليست قوةً على الإطلاق؛ فطبقًا لقوانين نيوتن، تتسبَّب القوى في الانحراف عن الحركة القصورية، لكن الحركة الحرة بفعل الجاذبية ليست سوى حركة قصورية. ما يحدث بدلًا من ذلك أنَّ الجاذبية هي التي تحدِّد الأطر القصورية؛ ومن ثمَّ تخبرنا القوى الأخرى في الكون — التفاعلات غير المتعلِّقة بالجاذبية — بمدى تسارُع الأجسام بالنسبة إلى تلك الأطر القصورية.

وثانيًا: يخلُّ هذا البديل بفكرة أن البنية القصورية عبارةٌ عن بنية «أساسية». إذا كانت الأطر القصورية تحدِّدها تفاعلات الجاذبية؛ ومن ثَم توزيع الكتل، فلن تعود البنية القصورية أساسًا ثابتًا تُصاغ الفيزياء بناءً عليه.

وأخيرًا: إنه يعرِّفنا أن البنية القصورية بنيةٌ «محلية». لقد عرفنا قبل ذلك أن الإطار المرجعي القصوري شيءٌ يمكن تحديده للكون بأكمله مرة واحدة، لكن إذا كانت البنية القصورية تُحدَّد وفقًا لتأثيرات الجاذبية للمادة، وإذا كانت هذه التأثيرات تتفاوت من مكان إلى آخرَ، فلا بد أن البنية القصورية تتفاوت بالمثل من مكان إلى آخرَ. يؤدي هذا إلى الاستعاضة عن فكرة وجود مجموعة واحدة من الأطر القصورية بفكرة وجود مجموعاتٍ متنوِّعةٍ متشابكة؛ مجموعة لكل منطقة في نسيج الزمكان. وسيستلزم هذا بدوره وَضْع قواعد لكيفية ارتباط المجموعات المتجاورة من الأطر إحداها بالأخرى، وهذه القواعد هي التي أطلَق عليها علماء الفيزياء «انحناء الزمكان».

(يُنسب الفضل بوجه عام إلى أينشتاين في التوصُّل إلى هذه الفكرة البارزة بشأن الجاذبية؛ فقد تخيَّل ما سيكون عليه الأمر إن كنت في مصعدٍ يسقط سقوطًا حرًّا في عموده، واستنتج أنَّ الأمر سيكون كما لو أنه لا توجد جاذبية على الإطلاق. وقد اشتُهِر عنه أنه قال عن لحظة وصوله إلى هذا الاكتشاف، إنها «أسعد لحظة في حياتي». على الرغم من ذلك، فلا بد أن نيوتن قد فهِم هذه النقطة بدرجةٍ ما؛ ذلك أنَّ نظام الأرض والقمر على سبيل المثال يتسارع بوتيرةٍ ثابتة في دورانه حول الشمس، لكن نيوتن كان يدرك أنه يستطيع تطبيقَ قوانين الفيزياء التي وضعها على الأرض والقمر، كما لو كانت الشمس غير موجودة.)

هل هذا التغيير في مفهومنا عن القصور الذاتي «ضروري»؟ كلَّا، لا يمكن الجزم بذلك. يمكننا الاستمرار في زعمِ أن البنية القصورية مطلَقة ولا تتأثر بالجاذبية، لكن النتيجة ستكون أن البنية «القصورية» لا يمكن الكشفُ عنها، مثلما أننا لا نستطيع اكتشافَ إطار السكون المطلق بناءً على مبدأ النسبية. وهذا احتمالٌ واقعيٌّ بناءً على نهج «الهندسة أولًا» فيما يتعلَّق بالزمكان؛ إذ لا توجد علاقة مفاهيمية بين بنية الزمكان وحركات الأجسام. ومن هذا المنظور، فإنَّ هذه الأفكارَ المتعلِّقة بالسقوط الحر تشير على الأكثر إلى أنه ينبغي البحث عن بنيةٍ مختلفة للزمكان (تمامًا مثلما أنَّ عدم إمكانية رصد السكون المطلَق كان سببًا وجيهًا للتخلص من فكرة المكان المطلَق، لكنه لم يضطرنا إلى ذلك في الحقيقة). وعلى النقيض من ذلك، في نهج «الديناميكا أولًا»، فإن إدراك أن الحركات القصورية تُحدد الجاذبية هو اكتشاف مباشِر بشأن بنية الزمكان. لا شكَّ أن الفرق دقيقٌ للغاية، مما يسمح بمجال كبير للخلاف، ولكن حالة الجاذبية تدفع بقوة إلى فَهْم هندسة الزمكان، باعتبارها تقنينًا لمفاهيمِ القصور الذاتي المستخدَمة في قوانين الفيزياء، لا باعتبارها حالةً مستقلة منطقيًّا عنها.

لقد وُضع الجزءُ الأكبر من الفلسفة التي ناقشناها في هذا الفصل خلال العقود القليلة الماضية، وبعضه من الأعمال الحديثة للغاية، أما الفيزياء التي ناقشناها فتعود إلى قرون مضت. وفي الفصل الثالث، سننتقل إلى تناول الفيزياء الحديثة وندرُس الأسئلة المفاهيمية التي تثيرها نظرية النسبية، لكننا سنرى أن معظم الرؤى التي توصَّلنا إليها في هذا الفصل ستنطبق أيضًا على تلك النظرية الأحدث والأغرب.

الفصل الثالث

النسبية وفلسفتها

في الثقافة العامة، تتمثَّل الفكرة المركزية لنظرية النسبية — وهي مصدر اسمها بالطبع — في رؤية أينشتاين العميقة بأن «الحركة نسبية». متسلحًا بتلك الرؤية، (يقال) إن أينشتاين ما انفك يجدِّد فَهْمنا للمكان والزمان، مطيحًا بالأفكار التي سادت منذ عصر نيوتن.

غير أننا رأينا بالفعل أن هذه ليست هي الحقيقة كاملة؛ إذ يعود مبدأ النسبية إلى القرن السابع عشر على الأقل، وإن لم يكن قد سُمي بذلك بعد. ومثلما سنرى، فإنَّ نظرية النسبية الأصلية تنبع، في حقيقة الأمر، من عدم التوافق الجلي بين مبدأ النسبية وبين اكتشافات الفيزياء في القرن التاسع عشر التي كان يبدو أنها راسخة هي أيضًا؛ ومن رؤية أينشتاين بأنه يمكن استعادة التوافق على حسابِ تغيير كيفية تفكيرنا بشأن المكان والزمان. في هذا الفصل، سنرى كيفيةَ القيام بهذه الخدعة، ونستعرض بعضًا من تَبِعاتها التي تنطوي على مفارقات، ونُعيد النظر فيما تناولناه في الفصل الثاني من ألغازٍ وجدالاتٍ بشأن الحركة والمكان؛ إذ ندرُسها من هذا المنظور الجديد المناقض للبديهة.

مشاكل مبدأ النسبية: الضوء بصفته موجة

حاوِل حلَّ هذه المسألة الرياضية البسيطة:

> طائرة مقاتلة تطلق الرصاصَ بسرعة ٣٤٠ مترًا في الثانية. والسرعة القصوى للطائرة ٢٦٠ مترًا في الثانية. فكم ستكون سرعة إطلاق الرصاص وهي تحلِّق بسرعتها القصوى؟

الإجابة الواضحة بالطبع هي ٣٤٠ + ٢٦٠ = ٦٠٠ متر في الثانية، وهي أيضًا إجابة صحيحة فيزيائيًّا (إذا تجاهلنا مقاومةَ الهواء).

على الرغم من ذلك، توجد مسألةٌ مشابهة من حيث التركيب وإجابتها مختلفة:

> تبلغ سرعة الموجات الصوتية المنبعِثة من محرِّكات طائرة مقاتلة ٣٤٠ مترًا في الثانية. والسرعة القصوى للطائرة ٢٦٠ مترًا في الثانية. إذا كنت تقف أمام الطائرة وتسمع محرِّكاتها، فما هي سرعة الموجات الصوتية حين تسمعها؟

الإجابة الصحيحة عن «هذا السؤال» ليست ٣٤٠ + ٢٦٠ = ٦٠٠ متر في الثانية؛ بل هي ٣٤٠ مترًا فقط في الثانية. فموجات الصوت تنتقل بسرعة الصوت بغضِّ النظر عن مدى سرعة مصدر الصوت.

ما وجهُ الاختلافِ في المسألتَين إذن؟ ينطلق الرصاص من المدفع الرشاش؛ ومن ثَم فهو يتخذ سرعةَ المدفع الرشاش. أما الموجات الصوتية فتنتشر في الهواء؛ ومن ثَم فإن سرعتها ثابتة وفقًا لفيزياء الهواء ولا تتوقَّف على سرعةِ مصدر الصوت. (يعتمد «تردُّد» الموجات الصوتية على سرعة المصدر، وهذا هو تأثيرُ دوبلر الشهير، والذي يعرفه الجميع حين يسمعون عويلَ صفَّارات الإنذار الخاصة بسيارات الشرطة، بينما تتغيَّر حدَّة نغمتها وهي تمرُّ بهم؛ غير أنَّ «السرعة» لا تعتمد على سرعة المصدر.)

ومن نتائج ذلك أنَّ سرعة الصوت بالنسبة إليك تعتمد على مدى سرعتك بالنسبة إلى الهواء، لكن ذلك لا يهمُّ على الإطلاق في حالة وابل الرصاص؛ فسرعتك بالنسبة لمصدر الرصاص هي كلُّ ما يهم. يُعمَّم هذا الدرس على أي ظاهرة تشبه الموجةَ (مثل الموجات الصوتية في الأجسام الصلبة، وأمواج المياه في البحار، وغير ذلك): سرعة الموجة ثابتة بالنسبة إلى الوسط الذي تنتقل فيه، ولا تعتمد على سرعةِ مصدر الموجة. على الرغم من ذلك، فلن تستطيع ملاحظة أن الموجةَ ثابتة إلا إذا كنتَ ساكنًا بالنسبة إلى الوسط. أما إذا كنتَ تتحرَّك في الوسط، فستلاحظ أن الموجات لها سرعات مختلفة بناءً على الاتجاه الذي تتخذه.

سنعرض فيما يلي طريقةً مختلِفة لتوضيح المسألة بناءً على الأفكار الواردة في الفصل الثاني. تُعرَّف سرعة الموجة بالنسبة إلى اختيارٍ خاصٍّ من الأطر القصورية؛ ويُقصد به الإطار؛ حيث الوسطُ الذي تسير فيه الموجة ثابت. وإذا قست سرعة الموجة في أي إطار قصوري آخر، فستحصل على إجابة مختلفة، وهي إجابة تعتمد على الاتجاه الذي تتخذه الموجة. وعلى الجانب الآخر، تُعرف سرعة الرصاصة بالنسبة إلى الإطار القصوري، حيث يكون مصدر الرصاصة ساكنًا.

هل يخلُّ أيٌّ من هذه الأمثلة بمبدأ النسبية؟ كلَّا، لا يخلُّ أيٌّ من هذه الأمثلة بمبدأ النسبية أكثرَ مما تخلُّ حقيقةُ أنَّ الأجسام تسقط بفكرةِ أنه لا يوجد اتجاه مفضَّل في

الفضاء. ففي كلتا الحالتَين، ثمَّة شيء مادي يخلُّ بالتناظر الأساسي للقوانين. لكن فيزياء هذا الشيء نفسِه لا تزال تخضع لمبدأ النسبية؛ إذا كان الهواء نفسه في حالة حركة على سبيل المثال، فإن سرعة الصوت تقاس بالنسبة إلى ذلك الإطار المتحرِّك.

لكن هذه الحجة تعتمد بالأحرى على حقيقةِ أن الموجات الصوتية في الغلاف الجوي للأرض ظاهرةٌ محلية، بل يمكن القول إنها محدودة. إذا امتلأ الكون كله بالهواء — وهذا مستحيل — ولم تظهر في الهواء أيُّ رياح أو أي حركة محلية أخرى، فسيستحيل الخروج من البيئة المحلية التي اختل تناظرها. وفي تلك الحالة، سيصبح من غير الواضح تمامًا ما إذا كان مبدأ النسبية ينطبق بالفعل أم لا.

صحيحٌ أنَّ الكون ليس ممتلئًا بالهواء، لكنه ممتلئ بالضوء. وعلى الرغم من أنَّ كون الضوء موجة ليس بالأمر الواضح أو البديهي؛ فقد ظهر الكثير من الأدلة في بداية القرن العشرين التي تشير إلى أنه كذلك بالفعل. فتأسيسًا على أعمالٍ مهمة امتدت لنصف قرن، أثبت عالِم الفيزياء العظيم جيمس كليرك ماكسويل، أن المجال المغناطيسي المتغير يمكن أن يخلق مجالًا كهربيًّا، وأن المجال الكهربي المتغير يمكن أن يخلق مجالًا مغناطيسيًّا، وأن العملية برُمَّتها — الكهربي إلى المغناطيسي إلى الكهربي إلى المغناطيسي إلى … — هي عمليةٌ من شأنها أن تتسم بالاكتفاء الذاتي وأن تنتقل في المكان بسرعة الضوء. تلقَّت فكرةُ أن الضوء عبارةٌ عن موجةٍ تأكيدًا تجريبيًّا مذهلًا، لا سيما في إنشاء موجات الراديو ونقلها واستقبالها في أواخر القرن التاسع عشر.

إذا كان الضوء عبارةً عن موجة، فيبدو أن هذا يعني ضمنيًّا وجودَ وسيط ينتقل فيه، وهو الوسيط الذي أطلق عليه علماء الفيزياء في ذلك الوقت «الأثير»، وهو وسيطٌ لا تدركه الحواس لكنَّه ضروري لفهم الضوء. وبناءً على هذا، فإنَّ سرعة الضوء مستقلة عن سرعةِ مصدره، لكنها ستتحدَّد بالنسبة إلى إطار السكون المتمثِّل في الأثير.

غير أنَّ هذا يطرح أمامنا لغزَين؛ أحدُهما مفاهيميٌّ والآخرُ عملي. اللغز المفاهيمي هو: ألا تتعارض فكرةُ الأثير مع مبدأ النسبية؟ فليس الأثير محليًّا أو محدودًا مثل الغلاف الجوي للأرض؛ أي إنَّ الأثير لا بد أن يملأ المكان بما أنَّ الضوء يمكن أن يوجد في أي مكان. وهذا الوسيط الذي لا يمكن الكشف عنه، ويملأ المكان، وتتحدَّد حركة الضوء بالنسبة إليه، يتشابهُ إلى حدٍّ كبير مع فكرةِ إطار السكون المطلَق، وفكرةِ المكان المطلَق التي صاغها نيوتن؛ أليست تلك من الأفكار التي انتهينا منها في الفصل الثاني؟

وبالنسبة إلى اللغز العملي، فهو كما يلي: إذا كان هناك — رغم كل شيء — إطار سكون مطلَق يحدِّد سرعة الضوء، فما سرعة حركتنا بالنسبة إليه؟ فالأرض تدور حول

الشمس، وتدور الشمس حول مركز المجرَّة، ولا يوجد سببٌ واضح يدفعنا إلى توقُّع تطابق إطار الأثير مع حركة الأرض. وعلى خلاف حالة نيوتن، يبدو أنه ينبغي أن يكون من الممكن «قياس» سرعة الأرض بالنسبة إلى إطار السكون، وذلك بقياس سرعة الضوء في اتجاهاتٍ مختلفة. (تذكَّر: سرعة الموجة لن تكون هي نفسها في كل الاتجاهات إلا إذا كنتَ أنت ثابتًا ساكنًا إلى الوسيط الذي يحمل الموجة؛ وإذا اختلفت السرعات مع اختلاف الاتجاهات، فهذا يجعلك تقيس مدى سرعة حركتك بالنسبة إلى ذلك الوسيط.)

لكن إجراء هذه التجارب ليس بالمهمة السهلة. فالضوء يتحرك بسرعة مذهلة تبلغ ٣٠٠ مليون متر في الثانية (حوالي ٧٠٠ مليون ميل في الساعة)؛ بينما تبلغ السرعة المتجهة للأرض بالنسبة إلى الشمس حوالي ٣٠ ألف متر في الثانية، وتبلغ السرعة المتجهة للشمس بالنسبة إلى مركز المجرَّة حوالي ١٥٠ مترًا في الثانية. ومن ثمَّ فإننا نتحدَّث عن توقُّعاتٍ غيرِ واضحةٍ للغاية في سرعة الضوء المقيسة، وتغييراتٍ بالغة الصِّغر. لكن إجراء التجربة ممكن، والنتيجة واضحةٌ تمامًا (وكانت واضحة تمامًا بالفعل حتى منذ بداية القرن العشرين)؛ إذا كان هناك إطارٌ أثير، فإن الأرض لا تتحرَّك بالنسبة إليه. إذا أردنا التعبير عن المسألة بطريقةٍ أخرى، يمكننا القول: في الإطار المرجعي للأرض، لا تعتمد سرعة الضوء على مصدره.

كان الاضطرار إلى قبولِ فكرة الأثير من الأساس والتخلي الفعَّال عن مبدأ النسبية؛ مزعجًا بعض الشيء بالفعل. والأكثر إزعاجًا أن يثبِّت شيء محدود مثل «الأرض» إطار الأثير. يمكن التوصُّل إلى أسباب بالطبع، وقد تحدَّث علماء الفيزياء في مطلع القرن العشرين عن فرضية «سَحب الأثير»، التي تقول بأنَّ الأجسام الضخمة تَسحَب الأثير، وكان من الممكن أن تؤديَ هذه الأسباب إلى برامجَ بحثيةٍ مثمرة. على الرغم من ذلك، فلا يزال هناك شعور بأن ثمَّة حلقة مفقودة.

ازدهار النسبية

لِنراجع المعضلة. إذا كان الضوء موجةً، فلا بد من وجود وسيط ينتقل فيه. وسيكون هذا الوسيط فعَّالًا في تحديد إطار للسكون، مما يتعارض مع مبدأ النسبية؛ ويمكننا الكشف عن إطار السكون ذاك، بالبحث عن الإطار الذي تكون سرعة الضوء فيه مستقلةً عن مصدره. وبناءً على هذا، فإننا سنضطر إلى إما التخلِّي عن مبدأ النسبية (ومن ثمَّ التخلي

عن اكتشافاتنا بشأن المكان والقصور الذاتي) وإما التخلي عن نظريةِ أن الضوء موجةٌ (ومن ثمَّ التخلي عن كل تلك التنبؤات التجريبية البارزة).

في حياة الإنسان العادية، للأسف، تشيع حالاتُ التصادم بين المبادئ التي لا يمكن التوفيقُ بينها، ولا سبيل للمضي قُدمًا إلا بالمساومة أو تحديد الأولويات. لكن تاريخ الفيزياء يخبرنا أن الطبيعة لا تحب المساومة. فعندما يبدو التعارض بين مبدأَين عميقَين في الفيزياء، في الغالب لا يكون أيٌّ منهما هو ما يجب التخلي عنه، بل افتراض أساسي لم يكن يقبل الجدال حتى ذلك الحين.

فعلى غرارِ ما فعله ألبرت أينشتاين في عام ١٩٠٥، سنطرح السؤال التالي: ماذا لو أنَّ مبدأ النسبية لا يزال صحيحًا، وكانت سرعة الضوء مستقلة عن سرعة المصدر؟ إنَّ الجمع بين هاتَين الفكرتَين يخبرنا بأنَّ سرعة الضوء مستقلةٌ عن سرعة المصدر في «كل» الأطر المرجعية. يبدو ذلك مستحيلًا، لكن لندرُس الأمر عن قربٍ أولًا. لنفترض — على وجه التحديد — أنني أطلقت نبضةً ضوئية بسرعة ٣٠٠ مليون متر في الثانية، وأنت قد لاحقتها ولنقُل بسرعة ٢٠٠ مليون متر في الثانية. في تلك الحالة، يسبقك الضوء بمقدار ١٠٠ مليون متر في الثانية؛ فهذه إذن هي السرعة التي ستقيسها بينما تتحرك (أليس كذلك؟). (وإذا جريت في الاتجاه المعاكس، فستقيس سرعة الضوء بأنها تبلغ ٥٠٠ مليون متر في الثانية.)

لكن لقياس سرعة الضوء في إطارك المرجعي، ستحتاج إلى إحضار شريط قياس، أو بالأحرى قضيب قياس، وساعة مضبوطة. لن تكون نتيجة قياس سرعة الضوء الذي تلاحقه ١٠٠ مليون متر في الثانية إلا إذا كان قضيب القياس وساعة التوقُّف الخاصَّان بك يتوافقان مع القضيب والساعة اللذين معي. وما أدركه أينشتاين أن هذه الحالة تمثِّل افتراضًا فيزيائيًّا جوهريًّا، وليست مجرَّد حقيقة. وقد بيَّن أننا نستطيع التمسُّك بمبدأ النسبية والتمسك بفكرةِ أن سرعة الضوء مستقلة عن مصدره؛ بشرط أن نكون على استعدادٍ لقبول أنَّ معيار الحركة، بل معايير الهندسة المكانية والزمانية بأكملها، ستتفاوت من إطارٍ قصوريٍّ إلى آخر. ففي نظرية النسبية لأينشتاين، لا يعود إلى مفاهيمَ مثل المسافة المكانية والمدة الزمنية أيُّ معنًى مطلَق ومستقل عن الإطار. فما هو «نسبي» في نظرية النسبية ليس الحركة فحسب، بل الزمان والمكان أيضًا.

وبعد قرن من الزمان، أصبح ما يعنيه ذلك كلُّه أمرًا مؤكدًا لا يقبل الجدال «من المنظور الرياضي». ومما لا شك فيه أيضًا أنَّ الرياضيات التي تصف النظريةَ ناجحة؛

فقوانين أينشتاين المعدَّلة، بشأن العلاقات بين الأطر المرجعية، تقع في الصميم من علم الفيزياء الفلكية الحديثة وعلم فيزياء الجسيمات. أما فيما يتعلَّق بالمعنى «المفاهيمي» لتلك القوانين وكيفية فهمها، فتلك مسألة أخرى، وهي ما سنتناوله في معظمِ ما تبقَّى من هذا الفصل.

تمدُّد الزمن ومفارقة التوءم

سبق أن ذكرت محتوى نظرية النسبية من حيث العلاقة بين الراصدين المختلفين في الأطر المرجعية المختلفة. على الرغم من ذلك، يمكن وصفُ تأثيراتها الفيزيائية المركزية لإطارٍ مرجعيٍّ واحد. والتأثيران الأساسيان لها هما:

- **تمدُّد الزمن**: في النظام المتحرِّك، تتباطأ كل العمليات الفيزيائية مقارنةً بتلك العمليات نفسها في النظام الساكن. من أمثلة ذلك على وجه التحديد، أن الساعة ذات الوقت المضبوط في حالة الثبات ستبطئ حينما تكون في حالة حركة.
- **تقلُّص الطول**: الجسم المتحرِّك ينكمش (في اتجاه الحركة) مقارنةً بالجسم نفسه حين يكون في حالة ثبات. ومن أمثلةِ ذلك على وجه التحديد، أن قضيب القياس الثابت أقصر في حالة الحركة مما هو عليه في حالة السكون.

(ثمَّة تأثير ثالث أقلُّ وضوحًا، وسنتناوله بعد قليل.)

بسبب تقلُّص الطول وتمدُّد الزمن، يمكنني قبول أن الراصد المتحرِّك يتحدَّث الصدقَ حين يقول: «لقد قست سرعةَ الضوء ووجدتها ٣٠٠ مليون متر في الثانية»، حتى إذا توصلتُ إلى النتيجةِ نفسها عندما قستُها بنفسي. لا يوجد تناقضٌ بين هذا وذاك لأنه — من منظوري «أنا» — أجريت قياساتك وفقًا لساعاتٍ أبطأ وقضبان قياس منكمشة؛ ومن ثمَّ فوفقًا لحالة الضوء لديَّ، ينبغي إعادة ضبط أدواتك كي تكونَ النتيجة دقيقة. تُثير هاتان الحالتان قضيتَين متشابهتَين إلى حدٍّ كبير، لكنني سأركِّز على تمدُّد الزمن فحسب، بدافع التبسيط وضيق المجال.

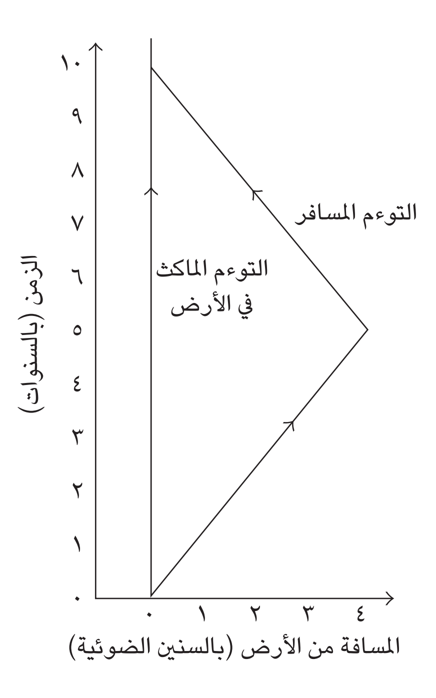
يُعَد تمدُّد الزمن من تنبؤات النسبية التي «يمكن رصدُها مباشرةً». ونظرًا لأنَّ سرعة الضوء فائقةٌ للغاية، تتجلَّى هذه الظاهرة بأكبرِ درجةٍ في سلوك الجسيمات دون الذرية (فهي الأشياءُ الوحيدة التي يمكننا أن نزيدَ سرعتها فعليًّا إلى ما يقرُب من سرعة الضوء). العديد من هذه الجسيمات غير مستقر؛ إذ تتحلَّل إلى جسيماتٍ أخرى، ولها أزمنة محدَّدة

تستغرقها في التحلُّل، مما يجعلها بمثابةِ ساعات من نوعٍ ما. تتنبأ النسبية بأن أزمنة التحلُّل تتباطأ كلما زادت سرعة حركة الجسيمات، وهذا ما يجري رصدُه بالتحديد في كلٍّ من مسرِّعات الجسيمات التي يبنيها الإنسان وفي التجارب الطبيعية التي تحدُث، حين تضرب الأشعة الكونية السريعة الحركة الغلافَ الجوي للأرض. يمكن أن يكون مقدار تمدُّد الزمن المتوقَّع كبيرًا — فقد يبلغ عشرة أضعافٍ في تجارب الأشعة الكونية على سبيل المثال — وتؤدي التجارب بالفعل إلى إنتاجِ تلك التوقعات تمامًا. على الرغم من ذلك، فمن الأصعب إنتاج عمليات التمدُّد الزمني الكبيرة للأجسام الضخمة، لكن الساعات الذرية الحديثة تتسم بدقةٍ بالغة، حتى إنها تستطيع قياسَ حتى عمليات تمدُّد الزمن الصغيرة الناجمة عن وَضْع الساعة في طائرة. وأُكرِّر أن التجارب تنجح في إنتاج التوقعات.

على الرغم من ذلك، يوجد تعارضٌ بيِّن في فكرة تمدُّد الزمن نفسها. فقد ذكرتُ أنَّ الساعات المتحركة تبطئ، لكن الحركة نسبية. إذا كنت تتحرك بسرعة بالنسبة إليَّ، فسأتوقَّع أن ساعتك أبطأ. لكني «أنا» الذي أتحرَّك بسرعة بالنسبة إليك؛ ومن ثمَّ — فوفقًا لمبدأ النسبية — ستتوقَّع أنت أنَّ ساعتي هي التي تبطئ. يبدو هذا وكأنه تعارض: فكيف لساعتَين أن تبطئ إحداهما أكثرَ من الأخرى؟ إذا كانت الساعة «أ» أبطأ من الساعة «ب» بمرتَين، والساعة «ب» أبطأ من الساعة «أ» بمرتَين، أفلا يعني هذا أن الساعة «أ» أبطأ من الساعة «أ» نفسها بأربع مرات؟

يمكن توضيح «مفارقة الساعة» بواحدة من أشهر التجارب الفكرية في الفيزياء؛ ألا وهي «مفارقة التوءم». يحتدُّ الجدال بين توءمَين، ويقلع أحدهما في صاروخ وهو غاضب (ولنقل) إنه سار بسرعةٍ تساوي ٨٠ بالمائة من سرعة الضوء. بعد خمس سنوات (بحساب السنين على الأرض)، يندم على غضبه ويقرِّر الرجوع بالسرعة نفسها (الشكل ٣-١).

يفكِّر التوءم الماكث في الأرض على النحو التالي: يسافر أخي منذ عشر سنوات بسرعة تساوي ٨٠ بالمائة من سرعة الضوء؛ وتتنبأ نظريةُ النسبية بتباطؤ الزمن بالنسبة إليه. وبناءً على هذا، فلن تتقدَّم ساعته وهاتفه الذكي وحتى عملية تقدُّمه في العمر (في حقيقة الأمر) إلا بمقدار ست سنوات. عندما يعود إذن، سيكون أصغرَ مني. (في السرعات الأدنى والتأثيرات الأكثر ضآلة، تَبرُز هذه الصيغةُ بشكلٍ فعَّالٍ في التجارب التي تُحمل فيها الساعات على متن طائراتٍ تجوب العالَم؛ ولهذا يمكن اعتبارُ ما يُرصَد من تباطؤ



شكل ٣-١: مفارقة التوءم.

الساعات المتحرِّكة على متن الطائرات تأكيدًا تجريبيًّا على هذا التباطؤ الذي تتنبَّأ به النسبية.)

لكن تفكير التوءمِ الماكثِ في الأرض لا يتوقف عند هذا الحد. يستمر تفكيره كما يلي: طَوال هذا الوقت، كنت أسير «أنا» بسرعة تساوي ٨٠ بالمائة من سرعة الضوء بالنسبة إليه. لذلك يحقُّ له أيضًا أن يستنتج أنني سأكون أصغرَ منه. ولكن لا يمكن أن نكون نحن الاثنين أصغرَ من أحدنا الآخر! فمثلما هو الحال مع مفارقة الساعة، يبدو أنَّ تجربة التوءم الفكرية لا تؤدي إلى استشكال فكرة تمدُّد الزمن أو إلى غموضها فحسب، بل إلى عدم اتساقها في الحقيقة.

غير أنَّ عدم الاتساق في كلٍّ من هذه الحالات يوضح التناظرَ الجلي بين اثنين من تفسيراتِ ما يجري. ففي مفارقة الساعة، تبطئ الساعة المتحركة بالنسبة إلى الساعة الثابتة، وبعد ذلك يبدو أنَّ مبدأ النسبية يقضي بالمثل أن تبطئ الساعة الثابتة بالنسبة

إلى الساعة المتحركة. وفي مفارقة التوءم، يتباطأ تقدُّم عمر التوءم المسافر بالنسبة إلى التوءم المستقر في الأرض، وبعد ذلك يبدو أنَّ مبدأ النسبية يقضي بالمثل أن يتباطأ تقدُّم عمر التوءم المستقِر بالنسبة إلى التوءم المسافر. إن إدراك كيفية الإخلال بهذا التناظر الظاهري يمثِّل بداية فَهْم ما يجري وليس نهايته.

اتساق تمدُّد الزمن

إنَّ الإخلال بالتناظر في مفارقةِ التوءم مسألةٌ بسيطة إلى حدٍّ كبير. فثمة اختلافٌ ملحوظ بين التوءمَين: يقضي التوءمُ الماكثُ في الأرض كلَّ وقته يتحرك «بالسرعة المتجهة نفسها»، بينما يعود التوءم المسافرُ أدراجَه بعد أن يصل إلى منتصف الطريق. ومن ثمَّ يقطع النصفَ الثاني من رحلته بسرعةٍ متجهةٍ كبيرةٍ جدًّا بالنسبة إلى النصف الأول.

ذلك كفيل إذن بأن يزيل «التناقض»؛ فما من تناظرٍ تامٍّ على الرغم من كل شيءٍ بين موقفَي التوءمَين؛ ومن ثم فإن المنطق لا يقتضي استحالةَ أن يصبح أحدهما أصغرَ من الآخر. على الرغم من ذلك، فربما يظل التوءم المسافر يفكِّر كما يلي: يتحرَّك أخي الماكثُ في الأرض بسرعة مقارنةً بحركتي؛ ومن ثمَّ فإن ساعته أبطأ من ساعتي؛ ولهذا سأجده أصغر مني حين أراه. لم نزل نفتقر إلى «تفسير» الخطأ في هذه الحجة، أو توضيح للسبب في أنَّ التغيُّر الكبير في السرعة المتجهة للتوءم المسافر يؤدي إلى تمدُّدٍ كليٍّ في الزمن. لكننا أثبتنا على الأقل أنه لا يوجد عدمُ اتساقٍ في فكرةِ إمكانية حدوث ذلك.

(في بعض الأحيان — وحتى بين علماء الفيزياء الذين من المفترض أن لديهم معرفةً أفضل — تتردَّد فكرة أن «التسارع» هو الذي يؤدي إلى تمدُّد الزمن. غير أنَّ هذه الفكرة تقع ما بين التضليل البالغ والخطأ الفادح؛ فليس التسارع لازمًا إلا من حيث إنه ينبغي على التوءم المسافر أن يتسارع؛ من أجل أن ينجز جزءًا من رحلته بسرعة متجهة مختلفة تمامًا بالنسبة إلى الجزء الثاني. وإذا شعر التوءم الماكثُ في الأرض بالسَّأم وقرَّر أن يزيد سرعته إلى ٨٠ بالمائة من سرعة الضوء لبضع ثوانٍ، ثم يستدير ليتحرك في الاتجاه المعاكس لبضع ثوانٍ أخرى بسرعة تساوي ٨٠ بالمائة من سرعة الضوء، ثم يتوقَّف في النهاية من جديد، فإنه يكون قد تسارع بمقدارِ ما فعلَ أخوه التوءم، لكن ذلك لا يشكل أيَّ فرقٍ جوهري في فجوة العمر بينهما.)

مفارقة الساعة أقلُّ وضوحًا، لكنها تقرِّبنا إلى تفسيرٍ واقعي لما يجري. لعلك تتذكَّر بنيتَها: تتقدَّم الساعة المتحركة ببطء مقارنةً بالساعة الثابتة. فكيف يُقاس ذلك في الواقع؟ بالطريقة التالية:

(١) أحضر «ساعتَين» مضبوطتَين وأعطِ إحداهما لصديق.

(٢) قف في مسار الساعة المتحركة (أو المَركبة الفضائية التي تحمل الساعة). واطلب من صديقك الوقوفَ على مسافةٍ أبعدَ في المسار.

(٣) فور أن تمرَّ بك الساعة المتحركة، دوِّن (١) الوقت مثلما هو في ساعتك، (٢) الوقت مثلما هو في الساعة المتحركة.

(٤) سيفعل صديقك الشيءَ نفسَه حين تمرُّ به الساعة.

(٥) اجتمع مع صديقك وقارن الملاحظات. يمكنكما الآن التوصل إلى الفترة الزمنية المنقضية طبقًا لساعتَيكما، والفترة الزمنية المنقضية طبقًا للساعة المتحركة. وستكون النسبة بينهما هي مقدار تمدُّد الزمن.

أهم ما ينبغي ملاحظته هنا أننا لا نقارن بين ساعتَين، بل بين ثلاث ساعات: الساعة المتحرِّكة التي تتقدَّم ببطءٍ مقارنةً بالساعتَين الثابتتَين. وعلى النقيض من ذلك، ينصُّ مبدأ النسبية على أن الساعة الثابتة ستتقدم ببطء مقارنةً «بزوج» من الساعات المتحركة. غير أننا لا نستطيع الجمع بين هذَين المبدأَين ونستنتج — كما تنذر مفارقة الساعة — أن ساعةً ثابتةً واحدةً ستتقدَّم ببطءٍ مقارنةً بنفسها.

يبدو رغم ذلك أن التناقض لا يزال يلوح في الأفق. تخيَّل أن هناك «زوجَين» من الساعات: زوجًا ثابتًا وزوجًا متحركًا. يبدو حينها أننا نستطيع استنتاجَ أن زوجًا يتقدَّم ببطء مقارنةً بالزوج الآخر، لكن هذا أيضًا يبدو تناقضًا. ولكي ندرك السببَ في أنه لا يوجد تناقضٌ حقيقيٌّ في هذه الحالة، نحتاج إلى دراسةِ بروتوكول القياس بعنايةٍ أكبر. حينها سيتبيَّن لنا أن تمدُّد الزمن وتقلُّص الطول ليسا السمتَين الجديدتَين الوحيدتَين في نظرية النسبية الخاصة. وإنما توجد سِمة ثالثة أيضًا وهي: «نسبية التزامن».

نشرُ الزمن عَبْر الفضاء

من الأفكار الرئيسية في بروتوكول قياس تمدُّد الزمن أننا نستطيع التوصُّل إلى مقدار الوقت المنقضي في الإطار المرجعي، في أثناء رحلة الساعة المتحركة، وذلك عن طريق مقارنةِ

قراءة الوقت على ساعتي عند بداية رحلة الطيران، بالوقت على ساعة صديقي عند انتهاء رحلة الطيران. وسينطبق الأمر نفسه إذا كنَّا مهتمين بقياسِ سرعة الساعة (أو أي جسم متحرك آخر)؛ فالفرق بين قراءة الوقت على ساعتي والوقت على ساعة صديقي هو زمن الرحلة، والسرعة هي المسافة بيننا مقسومة على زمن الرحلة.

تقتضي هذه الاستراتيجية مزامنةَ ساعتَينا، بحيث يكون الوقت على الساعتَين موحدًا. إذا كانت ساعتي متأخرةً بمقدار خمس دقائق، فلن يمكننا الاعتماد على بروتوكول القياس. فكيف يمكننا أن نفعل ذلك إذن؟ أمامنا خياران طبيعيان:

(١) أتأكد أنا وصديقي من مزامنةِ ساعتَينا عندما نتقابل وجهًا لوجه، ونتفق على البروتوكول، وقبل أن يتَّجه كلٌّ منا إلى الموقع المتَّفق عليه.
(٢) بعد أن يصل صديقي إلى مكانه، أتصل به ونُجري مزامنةً لساعتَينا عَبْر الهاتف.

في الظروف العادية، يمكن استخدام أيٍّ من الطريقتَين. (الطريقة الأولى هي ما يتبعه المجرمون وجنودُ القوات الخاصة — على الأقل في الأفلام — قبل ارتكاب جريمة السرقة أو إنقاذ الرهائن، والطريقة الثانية هي المتَّبعة لتحديث إعدادات الوقت عَبْر الإنترنت في الهاتف أو جهاز الكمبيوتر). غير أنَّ الطريقتَين كلتَيهما تمثِّلان إشكاليةً في النسبية. ففي الطريقة الأولى، سيعني تمدُّد الزمن أنَّ الساعات المتحركة تتباطأ؛ ولهذا حتى إذا أجرينا مزامنةً لساعتَينا حين نلتقي، فربما لا تبقى متزامنة. وفي الطريقة الثانية، فإنَّ إشارات الهاتف (أو أي إشارة أخرى قد نجرِّبها) تتحرَّك بسرعة محدودة؛ ومن ثمَّ نحتاج إلى مراعاة زمن السفر المحدود الخاص بإشارات التزامن. لكننا لا نملك ذلك لأن هذا يتطلَّب منَّا معرفةَ سرعة الإشارة، ونحن نحتاج إلى مزامنة الساعات قبل أن نقيس سرعة الإشارة!

حين يواجِه المرءُ هذه المشكلةَ في المرة الأولى، فربما تبدو مشكلةً فنية أو حتى غيرَ ضرورية. ألا يوجد حلٌّ بسيط؛ طريقة مباشرة لا جدال عليها لمزامنة الساعات؟ كلَّا، لا يوجد. (جرِّب بنفسك.) المحصِّلة هي أن قياس سرعة الأجسام المتحركة (أو قياس تمدُّد الزمن) يتطلب ثلاثة عناصر وهي: قضبان قياس موثوقة، وساعات موثوقة توجد في عدة مواقع، و«قاعدة تزامن» لتحديد طريقة التنسيق بين الساعات؛ وهي ما يُطلِق عليه الفيلسوف هارفي براون قاعدةَ «نشر الزمن عَبْر الفضاء». يمكن أن توجد أكثرُ من قاعدة، وسيؤدي تنوُّع القواعد إلى تنوُّع السرعات للجسم المتحرك.

يجدُر بك الآن أن تكون قلقًا بشأن أساس النسبية. ألم أقُل قبل بضع صفحات فحسب إنَّ النظرية تتأسَّس على (١) مبدأ النسبية، و(٢) مُسلَّمة أنَّ سرعة الضوء لا

تعتمد على سرعة مصدره؟ وإذا كانت سرعة الضوء تعتمد على اختيار قاعدة تزامن، فإنَّ هذه المسلَّمة تبدو غير واضحة.

ثمَّة طريقة بارعة للتغلُّب على تلك المشكلة. إنَّ قياس الوقت الذي يستغرقه جسمٌ ما للانتقال من النقطة «أ» إلى النقطة «ب» يستلزم وجودَ ساعتَين (ساعة عند النقطة «أ» وساعة عند النقطة «ب») ومن ثمَّ يحتاج إلى قاعدةِ تزامن، لكن قياس الوقت الذي يستغرقه الجسم للانتقال من النقطة «أ» إلى النقطة «ب» ذهابًا وإيابًا؛ لا يستلزم سوى ساعة واحدة عند النقطة «أ». لذا يمكنك قياس «سرعة الضوء الثنائية الاتجاه» بنفسك، وذلك باستخدام قضيب قياس وساعة توقُّف ومصباح يدوي ومرآة، وإليك الطريقةَ فيما يلي:

(١) قف عند أحدِ طرَفَي قضيب القياس، وضعِ المرآةَ عند الطرف الآخر.

(٢) سلِّط المصباحَ اليدوي على المرآة. أنِر المصباح، وابدأ ساعةَ التوقُّف في اللحظة نفسها.

(٣) حالما ترى ضوءَ المصباح في المرآة (مما يعني أن الضوء قد سافر إلى المرآة وعاد مرةً أخرى)، أوقفِ الساعة.

(٤) أنت الآن تعرف مقدارَ الوقت الذي استغرقه الضوء كي يسيرَ مسافة مترَين، إلى المرآة ومنها. إذن، السرعة الثنائية الاتجاه تساوي [مترَين] مقسومة على [الوقت المنقضي على ساعة التوقف].

(تتطلب هذه التجربة ردودَ أفعال سريعة؛ فسوف تحتاج إلى إيقاف الساعة بعد حوالي ستة نانو ثانية من تشغيلها!)

يمكننا أن نصوغ المسلَّمة بالصيغة التالية: «سرعة الضوء «الثنائية الاتجاه» مستقلة عن سرعة مصدر الضوء، وعن الاتجاه الذي ينبعث فيه الضوء». وليسَت هذه الحقيقة بمثابة أساسٍ للنسبية فحسب، بل تتيح لنا أيضًا أن نضع قاعدةَ تزامُن طبيعية للغاية، وهي «قاعدة التزامن لأينشتاين»، التي تنصُّ على أنه يجب أن نزامنَ الساعات، بحيث تصبح سرعة الضوء الأحادية الاتجاه مستقلةً هي أيضًا عن سرعة المصدر وعن اتجاه انبعاث الضوء. يضمن هذا الاختيار توفيرَ تعريف جيد بفضل الثبات المفترَض للسرعة الثنائية الاتجاه.

سنوضِّح الآن كيفيةَ التطبيق العملي للقاعدة. تبلغ سرعة الضوء الثنائية الاتجاه ٣٠٠ ألف كيلومتر في الثانية؛ ومن ثمَّ سنعرِّف «الثانية الضوئية» بأنها تساوي ٣٠٠ ألف

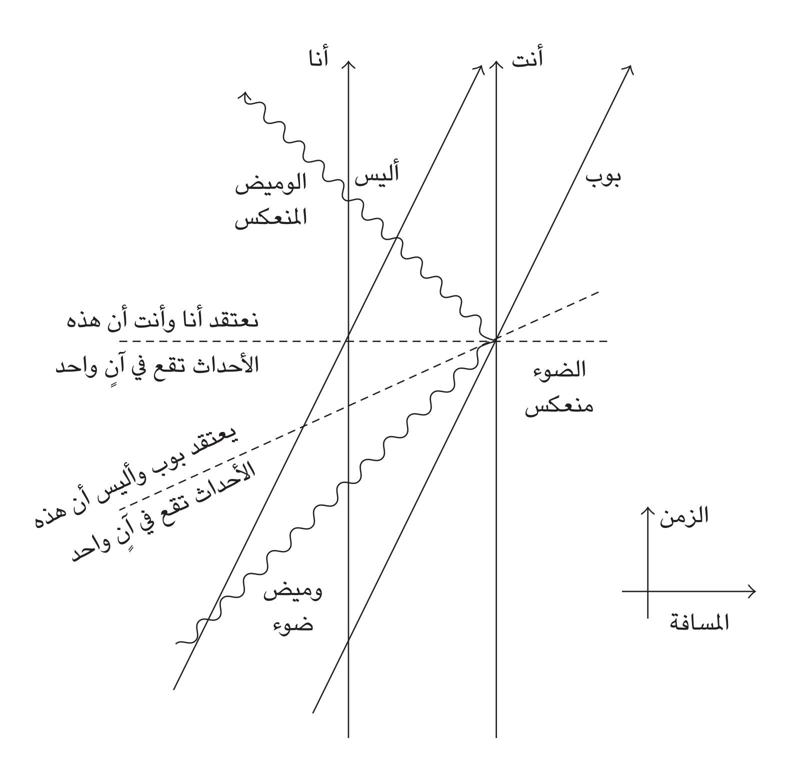
كيلومتر. لنفترِض أنك تقف على مسافةِ ثلاثة ملايين كيلومتر مني؛ أي على مسافة ١٠ ثوانٍ ضوئية. سأرسل إليك إشارةً بأنَّ «الوقت على ساعتي هو: ١٢:٠٠:٠٠». حينئذٍ، ينبغي أن تضبط ساعتك على: ١٢:٠٠:١٠، وبهذا فوفقًا لساعتَينا، استغرق الضوء ١٠ ثوانٍ لقطعِ مسافة ١٠ ثوانٍ ضوئية، وسرعة الضوء الأحادية الاتجاه هي أيضًا تساوي ٣٠٠ ألف كيلومتر في الثانية.

يمكننا وصفُ تلك الطريقة نفسِها بشكلٍ آخر. لنفترض أني أرسلت إشارةً إليك وأنت ردَدْتها عليَّ فورًا. عندما تعود الإشارة إليَّ، سيكون الوقت على ساعتي ١٢:٠٠:٢٠ (بصرف النظر عن أي قاعدة تزامن). يجب أن تضبط ساعتك بحيث يكون الوقت لحظةَ ارتداد الإشارة في المنتصف بالضبط بين الوقت على ساعتي وقت انطلاق الإشارة (١٢:٠٠:٠٠) ووقت عودتها (١٢:٠٠:٢٠)؛ أي ينبغي أن تضبط الساعة على الوقت ١٢:٠٠:١٠. يضمن اختيار المنتصف أن نسجِّل الضوءَ على أنه يتحرك بالسرعة نفسها، في طريق الانطلاق وطريق العودة.

تنفرد الفيزياء تقريبًا باستخدام قاعدة التزامن لأينشتاين؛ ومن ثَم تُفترض تلك القاعدة في معادلات تمدُّد الزمن (وفي تقلُّص الطول أيضًا في الواقع). وبناءً على هذا، ينبغي تخيُّل معظم قياسات تمدُّد الزمن التي تناولتها مسبقًا — الأشعة الكونية، والجسيمات في المسرِّعات، وغيرها — باعتبار أنها توضِّح تمدُّد الزمن طبقًا لقاعدة أينشتاين. على الرغم من ذلك، ينبغي ألَّا تُتخيَّل جميع القياسات على هذا النحو. ففي تجربة مفارقة التوءم الفكرية وتجربة الساعة المنقولة على متن الطائرة، تنطلق ساعة وتعود ثم نجد أنها تقدَّمت ببطء مقارنةً بالساعة الأخرى. إننا لا نحتاج إذن إلى أي قاعدة تزامُن لذكرِ هذه الفرضية أو اختبارها؛ يمكننا اعتبار الأمرِ بوصفه قياسًا لـ «تمدُّد الزمن الثنائي الاتجاه».

تبدو قاعدة أينشتاين طبيعيةً، بل واضحة، لكنها تنطوي على استنتاجٍ غير واضح؛ وهو أن الأحكام المتعلِّقة بوقوع حدثَين في وقتٍ واحدٍ تعتمد على الإطار القصوري الذي تستخدمه. وكي نفهم هذا الاستنتاج، لنفترض أنك تبعُد عني بمقدار ١٠ ثوانٍ ضوئية جهة الشرق، وأنه يوجد وميضٌ ساطع في مكانٍ ما جهة الغرب منَّا. أرى الوميض في الساعة ١٢:٠٠:٠٠، وأنت تعكسه إليَّ مرةً أخرى باستخدام مرآة في الساعة ١٢:٠٠:١٠. لذا إذا نظرت إلى ساعتي في الساعة ١٢:٠٠:١٠، حينها يكون الوميض الذي تعكسه إليَّ ونظري في الساعة متزامنَين.

هذا التزامُن من منظوري «أنا» بالطبع. لنفترض أن أليس وبوب يسيران جهة الشرق، بسرعةٍ تساوي نصف سرعة الضوء، وهما يبتعدان عن مصدر الوميض مباشرةً. بينما أنظر في ساعتي، تمرُّ أليس بي، وبينما تتلقى أنت إشارتي، يمر بوب بجوارك بالسرعة نفسها. يمكن لبوب وأليس إذن استخدامُ وميض الضوء نفسه لمزامنةِ ساعتَيهما (انظر الشكل ٣-٢).



شكل ٣-٢: نسبية التزامن.

وعلى الرغم من ذلك، رأيت الوميض في الساعة: ١٢:٠٠:٠٠، لكن أليس لم تكن قد وصلت إليَّ حينها. لا بد أنها رأت الوميضَ قبلي بينما مرَّ بها وهو في طريقه إليَّ. وحين تردُّ وميضَ الضوء مرة أخرى باتجاهنا، ستتلقى أليس إشارةَ الارتداد قبلي لأنها قطعت في الوقت الفاصل بعضَ المسافة إلى بوب. ولهذا فإن نقطة المنتصف بين إرسال أليس

للإشارة وارتدادها عنها مرةً أخرى تقع قبل نقطة المنتصف بين إرسالي لإشارة وارتدادها عني مرةً أخرى. وهذا يعني أنني أختلف مع أليس بشأنِ الأوقات التي تزامنت مع وصول الإشارات إليك أنت وبوب.

إذن، وفقًا لقاعدةِ أينشتاين على الأقل، ففي مسألة الإطارَين اللذَين يتحرَّك كلٌّ منهما بالنسبة إلى الآخر، لا يختلف العلماء بشأن أطوال الأجسام أو معدَّل تدفُّق الزمن فحسب، بل يختلفون أيضًا بشأن أيِّ الأحداث التي تزامنت معًا. الحق أنَّ النتائج التي تنطوي عليها «نسبية التزامن» واسعةُ النطاق إلى حدٍّ كبير؛ ففي حالة وجود أي حدثَين لا يمرُّ الضوء من بينهما، سيتوافر خيارُ إطارٍ يتزامن فيه الحدثان، وخيارُ إطار يقع فيه الحدث الأول قبل الحدث الثاني، وخيار إطارٍ يقع فيه الحدث الثاني قبل الحدث الأول.

(ويُعَد هذا بالتبعية إحدى الطرق التي تساعد على فَهْم السبب في أنَّ النسبية تشير بقوة إلى استحالةِ أن يتحرك أيُّ شيء بسرعةٍ أكبرَ من سرعة الضوء؛ فأي إشارة أسرع من الضوء هي إشارة تعود بالزمن إلى الوراء بالنسبة إلى بعض الأطر المرجعية).

يؤدي هذا أخيرًا إلى حلِّ التناقض في مفارقة الساعة. فعند الحكمِ على ساعتَين متحركتَين في أي إطارٍ واحد، فإننا لن نجدَ أنهما تتقدَّمان ببطء فحسب، بل ستكونان متزامنتَين على النحو الخاطئ أيضًا. فللانتقال من ساعتَين ثابتتَين إلى ساعتَين متحركتَين ثم العودة مرةً أخرى، ينبغي أن نصحِّح الساعة مرتَين؛ مرة من أجل التزامن ومرة أخرى من أجل تمدُّد الزمن؛ وعندما نفعل ذلك يتبيَّن في نهاية المطاف أنه لا يوجد تناقضٌ في زعمِ أن كل زوجٍ من الساعات يتقدَّم ببطءٍ مقارنةً بالزوج الآخر.

اصطلاح التزامن

إنَّ قاعدة التزامن لأينشتاين توفِّر الاتساق لمفارقة الساعة، لكنها تنطوي على تَبعات غريبة للغاية. فيبدو أنَّ ما نقوله فيها أنَّ ما يحدث «الآن» يعتمد على سرعتي المتجهة؛ وإذا تغيَّرت سرعتي المتجهة، فستنتقل الأحداثُ البعيدة من الماضي إلى المستقبَل أو العكس. لتوضيحِ ما نقصده بهذه الغرابة، تخيَّل أن أخاك الحبيب يتزوج في مجرةِ أندروميدا التي تبعُد مسافة مليونَي سنة ضوئية. ستظل تتحرَّك ذهابًا وإيابًا قلقًا بشأن ما إذا كانت الأمور كلها ستسير على ما يرام، لكنك حينما تتحرك «ذهابًا»، فإن قاعدة التزامن لأينشتاين تعني أن حفل الزفاف لن يحدث إلا بعد ساعات؛ وعندما تتحرك «إيابًا»، فإن القاعدة تعني أنَّ الحفل انتهى بالأمس.

لكن هل قاعدة أينشتاين «صحيحة»؟ يمكننا بالطبع وَضْع تعريفاتٍ مختلفة لاصطلاحات تزامن الساعات: يمكننا أن نقرِّر مثلًا جعْل سرعة الضوء الأحادية الاتجاه مختلفة في اتجاهات مختلفة، أو يمكننا اختيارُ أكثر إطار نفضِّله ونقول إن الساعات في «كل» الأطر يجب أن تتفق مع «ذلك» الإطار فيما يتعلق بأي الأحداث هي المتزامنة. غير أنَّ قاعدة أينشتاين توفِّر مميزاتٍ مهمةً تفوق كلَّ ما ذُكر سابقًا؛ ومن هذه المميزات ما يتطلَّب منا اختيارَ إطارٍ مرجعي مفضَّل، ومنها ما يتطلَّب اختيار اتجاه مفضَّل في المكان؛ فمن ناحية عملية بدرجة أكبر، تصبح معادلات الفيزياء أبسطَ بكثيرٍ إذا تبنينا قاعدة التزامن لأينشتاين، بدلًا من أيٍّ من القواعد المنافسة. وبناءً على هذا، يمكننا القول إن قاعدة التزامن لأينشتاين هي الاختيار «العملي» الصحيح.

إنَّ القول إنها الاختيار الصحيح وإن الاختيارات الأخرى خاطئة — لا غير محبَّذة فحسب — مسألةٌ أخرى. ربما يفيد ذِكر بعض المقارنات في الفهم. في عملية ضبط الوقت مثلًا، تتمثل القاعدةُ المعتادة على الأرضِ في تقسيم العالم إلى ٢٤ منطقة زمنية، فيصبح لدينا ٢٤ خيارًا لوقت الظهيرة، وفي كل منطقة منها تحين الساعة ١٢:٠٠:٠٠ تقريبًا، عندما تصبح الشمس عموديةً على تلك المنطقة. وثمَّة قاعدة أخرى بديلة لضبط الوقت، وهي ضبط كل الساعات في كل مكان على الأرض حسب توقيت جرينتش. غير أنَّ هذه القاعدة البديلة لا تُستخدم في المعتاد؛ لأنه ليس من المناسب أن تحين الظهيرة عند منتصف الليل في بعض الأجزاء في العالم، لكن هذا لا يجعلها خاطئةً بل أقل نفعًا فحسب. (على الرغم من ذلك، ففي بعض الظروف مثل العمليات العسكرية، يتبيَّن أن هذه القاعدة أكثرُ نفعًا؛ إذ إنَّ مزايا وجود وقت مشترك تفوق عيوب ضبط الوقت من دون الاعتماد على الشمس والقمر). إنَّ ما ينفي وجود قاعدة أكثر صوابًا من الأخرى، هو أنه لا يوجد أيُّ شيء موضوعي فيه صواب أو خطأ؛ فبخلافِ ما اصطلحنا عليه، ما من حقيقةٍ في ذلك الأمر بشأن ماهية الوقت.

لنضرب مثالًا آخرَ: دائمًا ما تكون خطوط ورقة التمثيل البياني قائمة الزوايا، وينطبق الأمر نفسه على أنظمة الإحداثيات للخرائط؛ إذ غالبًا ما تكون محاورها قائمة الزوايا. ولهذا الخيار ميزاتٌ متعدِّدة، بعضها جلي وبعضها خفي. فعلى سبيل المثال، لا تتحقَّق مبرهنة فيثاغورس — مربع المسافة بين نقطتَين على مستوًى إحداثيٍّ يساوي مربَّع المسافة بينهما على المحور س زائد مربع المسافة بينهما على المحور ص، إلا إذا كانت المحاور قائمة الزوايا. وتحقيقًا لكل هذه الأغراض، فسيكون من «الأقل نفعًا» إليك

أن تكون خطوطُ ورقة التمثيل البياني بزاوية أخرى. لكن ورقة التمثيل البياني ليست «خاطئة» لأنه — مرة أخرى — ما من حقيقةٍ موضوعية تخبرنا بالزاوية «الفعلية» بين المحاور؛ فليست تلك المحاور سوى اختيارنا الخاص لكيفية إنشاء نظامٍ إحداثيٍّ للمكان.

ما يبقى على المحكِّ في هذه المسألة هو ما إذا كان للسؤال: «ما الذي يحدث «الآن» في مكانٍ ما بعيد؟» إجابة صحيحة وموضوعية (وفي هذه الحالة ستكون هناك قاعدة تزامن صحيحة وموضوعية، ويمكننا حينها أن نُحاجَّ بقوةٍ بأن هذه القاعدةَ هي قاعدة أينشتاين)، أم إنَّ الإجابة مسألةُ اصطلاح فحسب (وفي هذه الحالة يمكننا فَهْم قاعدة التزامن لأينشتاين — أو تزامن أينشتاين، باعتبارها اختيارًا منطقيًّا لذلك الاصطلاح، لكنها ليست الخيار الصحيح من الناحية الموضوعية).

(ثمَّة شيء غامض قليلًا بشأنِ كلمة «اصطلاحي» في هذا السياق. فبعض الاصطلاحات «اعتباطية» فحسب؛ بمعنى أنه لا يوجد سببٌ على الإطلاق لاستخدام كلمة «كلب» في اللغة العربية وعدم استخدام أيِّ كلمة أخرى للإشارة إلى الكلاب. وعلى النقيضِ من ذلك، فإن المحاور القائمة الزوايا والمعايير المرتبطة بالموقع المستخدمة لتحديد وقت الظهيرة، اصطلاحاتٌ جيدة؛ ولهذا فمن المنطقي موضوعيًّا أن تُستخدم في معظم المواقف. لكن المعيار الصحيح لتقييمها هو ما إذا كانت منطقية أم اعتباطية، وليس ما إذا كانت صحيحة أم خاطئة.)

تنبع إحدى الحجج الفلسفية لإحدى الإجابات الفريدة عن هذا السؤال من فلسفة الزمن، ومن الفكرة الواسعة الانتشار التي تُفيد بوجودِ اختلافٍ جوهريٍّ بين الماضي والمستقبل. وفقًا لهذه الطريقة في التفكير، فإنَّ الماضي ثابت، والمستقبل لم يأتِ بعدُ ومن ثَم فهو منفتح، أما الحاضر فهو على حافةِ الانتقال بين المستقبل والماضي؛ ومع تدفُّق الزمن، يزيد الماضي زيادةً مطردة ويتناقص المستقبل. إذا كانت هذه هي الطبيعة العميقة للزمن، فيبدو أنها تشير إلى مفهومٍ قاطع وغير اصطلاحي عن التزامن.

لطالما كانت هذه النظريةُ عن الزمن محلَّ خلاف في الفلسفة. فيقال إن تدفُّق الزمن ما هو إلا فكرة غير متسقة؛ فما التدفُّق إلا شيء يحدُث «في» الزمن؛ ومن ثمَّ فهو ليس منطقيًّا للزمن في حد ذاته. (ثمَّة شعار يشيع بين النقاد وهو: «ما مدى سرعة تدفُّق الزمن؛ أهي ثانية في الثانية؟») لكن الأهم فيما يتعلق بأغراضنا أن هذه الفكرةَ تتعارض تعارضًا كبيرًا مع فكرةِ أن التزامن نسبي (وهو ما فرضَه علينا اصطلاح التزامن لأينشتاين، بل ما يفرضه علينا أيُّ اصطلاح منطقي وصحيح من الناحية الموضوعية). وإذا كان

بإمكاني نَقْل حدثٍ من الماضي إلى المستقبل، وإعادته مرةً أخرى بمجرد الذهاب والإياب، وإذا كانت الأحداث التي مرَّت عليَّ في الماضي هي في المستقبل بالنسبة إليك؛ لأننا نتحرك بسرعاتٍ مختلفة، فسيصعب إدراكُ وجودِ فرقٍ جوهري بين طبيعتَي الماضي والمستقبل. يبدو أنَّ المفهوم الموضوعي للتزامن يستلزم أن يكون هذا المفهوم مطلقًا ومستقلًّا عن الإطار؛ وفور أن نقبَل بنسبية التزامن، فلن يتبقَّى سوى خطوةٍ صغيرةٍ لإدراك أن التزامن مسألةٌ اصطلاحية. (غير أنَّ ذلك أحدُ الموضوعات التي لم يتوقَّف الفلاسفة فيها عن الدفاع عن العديد من المواقف المختلِفة؛ فلم يستسلم المدافعون عن فكرةِ التزامن النسبي، ولا المدافعون عن التدفُّق الموضوعي للزمن، بأيِّ حال من الأحوال.)

الزمكان في تصوُّر منكوفسكي

لكي ندركَ المعنى الفعلي لاصطلاح التزامن على نحوٍ أفضل، سنعود إلى مفهوم الزمكان ونحدِّثه بما يتلاءم مع النسبية. تذكَّر أننا تخيَّلنا الزمكان (في الفصل الثاني) بإزالة أحدِ أبعاد المكان (حيث شبَّهنا المكان برُقاقة أكريليك)، ثم بنينا الزمكانَ بكومةٍ من هذه الرُّقاقات، بحيث تمثِّل كلٌّ منها لحظةً من الزمن. يأتي ذلك الزمكان — الذي أطلقنا عليه «الزمكان في تصوُّر جاليليو» — مزوَّدًا بثلاثِ بنًى وهي: الهندسة المكانية (التي تحدِّد المسافات والزوايا في كل رُقاقة)، والهندسة الزمانية (التي تحدِّد الفاصل الزمني بين الرُّقاقات) والبنية القصورية (التي تختار الأُطر القصورية التي تتحرك الأجسامُ الحرة في خطوط مستقيمة بالنسبة إليها). وفي ضوء النسبية، يمكننا أن ندرك الآن وجودَ بُعد آخرَ ضمني، وهو «بنية التزامن»؛ وتعني أنَّه لا يمكن القول عن نقطتَين في الزمكان إنهما متزامنتان إلا إذا كانتا على الرُّقاقة نفسها.

الطريقة الأسهل لتخيُّل الزمكان في النسبية الخاصة — وعادةً ما يطلَق عليها «الزمكان في تصوُّر منكوفسكي» نسبةً إلى عالِم الرياضيات الذي اقترحها بعد عمل أينشتاين بفترة وجيزة — هي أن تتخيَّل تسخينَ كومة من الرُّقاقات حتى تنصهر معًا، مما يترك لنا كتلةً من الأكريليك لكنه يمحو ملامحَ الرُّقاقات الفردية. في الزمكان وفقًا للنسبية الخاصة، لا تُصنَّف الأحداثُ ضمن مجموعاتٍ تقع جميعها في الوقت نفسه، بل تندرج تلك الأحداث ضمن مجموعةٍ رباعية الأبعاد.

لا تفتقر هذه المجموعة إلى البنية بالطبع، بل إنها بعيدة كلَّ البعد عن ذلك. في زمكان نيوتن (الزمكان كما فهمته قبل أن تدرُس مبدأ النسبية)، يمكننا أن نذكُر الفاصل

في الزمان والمكان بين أي حدثين بشكلٍ منفصل. وفي زمكان جاليليو، يمكننا أن نذكرَ الفاصل الزمني بين أي حدثين، لكن الفاصل المكاني بينهما لا يكون محدَّدًا (إلا بالنسبة إلى إطارٍ ما قصوريٍّ اعتباطيٍّ) ما لم يكونا متزامنَين. أما في زمكان منكوفسكي، فلا معنى للفاصل المكاني بين الأحداث ولا للفاصل الزماني بينها ما لم نثبِّت إطارًا قصوريًّا. ولهذا فإننا نستعيض عنهما بمفهومٍ موحَّد وهو: «المسافة الزمكانية» أو كما يطلَق عليه في العادة «الفاصل». وقد شرحه العالِم هيرمان منكوفسكي في واحدةٍ من أشهر الفقرات في الفيزياء على النحو التالي:

> ونتيجةً لهذا، فإن المكان بمفرده والزمان بمفرده محكومٌ عليهما بالتلاشي إلى محض ظلال، ولن يحافظ على وجودِ واقع مستقل إلا نوعٌ من الوحدة بينهما.

ما الذي يمثِّله هذا «الفاصل» في الحقيقة من المنظور الفيزيائي؟ عندما يمثِّل حدثان مرحلتَين في حياة الجسم الموجود نفسه — أو بشكلٍ أعمَّ، عندما ينتقل جسيمٌ سريع الحركة بين الحدثَين، فإن الفاصل بين الحدثَين هو زمن الرحلة الذي يمكن قياسه على ساعةٍ انتقلت بينهما في خطٍّ مستقيم. (يُطلق على هذه الأحداث «الأحداث المفصولة زمنيًّا»). وعندما لا يمكن الربط بين الحدثَين بجسمٍ متحرِّك أو حتى شعاع ضوء (الأحداث المفصولة مكانيًّا)، فسيوجد إطارٌ قصوري يتزامن فيه الحدثان، وعندئذٍ يصبح الفاصل هو المسافة المكانية العادية بينهما وفقًا لقياسها في ذلك الإطار.

توجد معادلةٌ بسيطة للغاية تعبِّر عن المسافة الزمكانية. اختَر أيَّ إطار قصوري، واستخدِم قاعدةَ التزامن لأينشتاين من أجل مزامنة الساعات بما يتناسب مع ذلك الإطار. وبالتعبير عن الحدثَين بالحرفَين «أ» و«ب»، تصبح المعادلة كما يلي:

$$(\text{الفاصل أ} - \text{ب})^{2} = (\text{المسافة الزمنية أ} - \text{ب})^{2} - (\text{المسافة المكانية أ} - \text{ب})^{2};$$

وفيها تُقاس المسافة الزمنية بالثواني، وتُقاس المسافة المكانية بالثواني الضوئية، أو تُقاس المسافة الزمنية بالسنين والمسافة المكانية بالسنين الضوئية، وهكذا. لعلكم تلاحظون تشابهًا كبيرًا للغاية بين هذه المعادلة وبين معادلة فيثاغورس التي تناولناها مسبقًا، لكنَّ هذه المعادلةَ تضم علامةَ سالب بالغة الأهمية. يصبح الفاصل صفرًا إذا كانت المسافة الزمنية تساوي المسافةَ المكانية — أي إنها تصبح صفرًا عندما يصل شعاعٌ ضوئي بين النقطة «أ» والنقطة «ب»، متحركًا بسرعة ثانية ضوئية في الثانية. (وإذا كانت

المسافة المكانية أكبرَ من الزمن، فعلينا أن نعكس علامةَ السالب من أجل الحصول على معادلةٍ منطقية).

على الرغم من وَضْع هذه المعادلة بالنسبة إلى إطارٍ قصوريٍّ واحد، فإنها تُعطي النتيجةَ نفسها في أي إطارٍ قصوري؛ فمن طرقِ صياغة معادلات النسبية استنتاجُ استقلال الإطار الخاص بمسافة الزمكان عن مبدأ النسبية، وعن الافتراض الخاص بسرعة الضوء الثنائية الاتجاه، وعن قاعدة التزامن لأينشتاين.

من الضروري ملاحظةُ أنه على الرغم من أن البنى الأساسية في زمكان منكوفسكي تختلف اختلافًا بارزًا عن البنى التي شهدناها في فيزياء نيوتن، فإنها بنًى أساسية بالمعنى نفسه الذي تعرَّفنا عليه من قبل، بمعنى أنها غير متغيرةٍ وجوهريةٌ في فيزياء الأجسام المادية. فمفهوم البنية القصورية على وجه الخصوص ضروريٌّ في الفيزياء النسبية وغير النسبية على حدٍّ سواء. وعلى الرغم من ذلك، فإن البنية القصورية ليست مستقلةً عن مسافة الزمكان؛ ومن المنظور الرياضي في الحقيقة (وبصرف النظر عن التفاصيل)، يمكننا استعادةُ الحقائق القصورية بالكامل من حقائق المسافة الزمكانية. وعما إذا كان هذا يعني من المنظور الفيزيائي أن البنية القصورية ثانوية بالنسبة إلى بنية المسافة الزمكانية أم لا، فتلك مسألةٌ أخرى، وسنتناولها عندما نعود إلى سؤالنا المركزي: «كيف نفهم تمدُّد الزمن؟».

التفسيرات الهندسية والديناميكية لتمدُّد الزمن

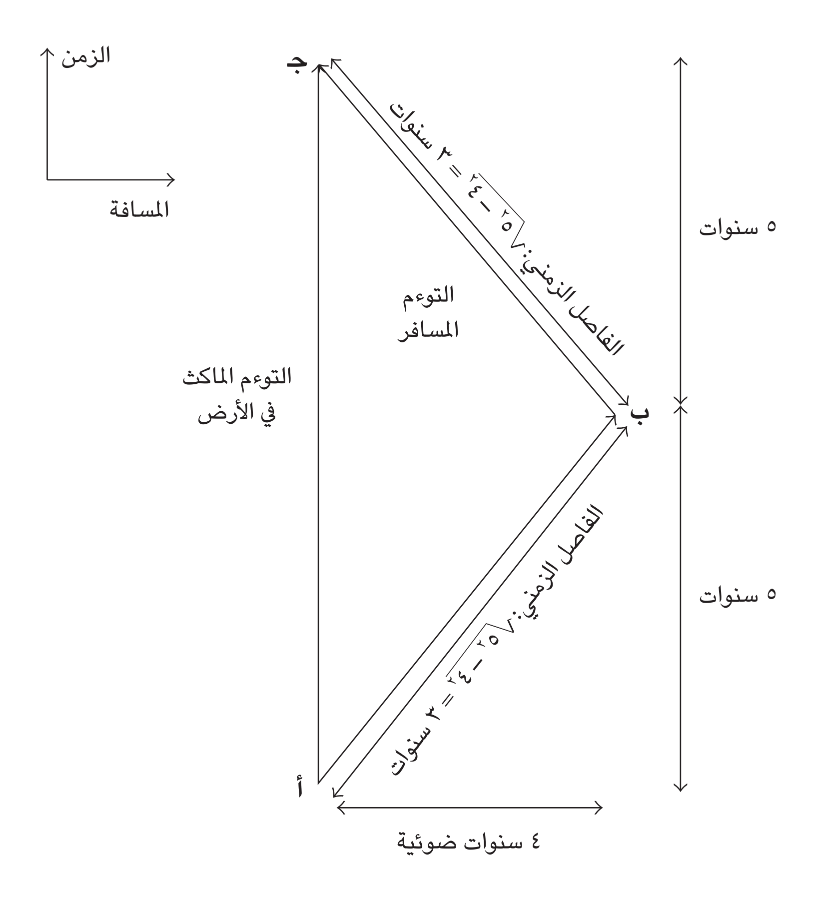
سنتناول مفارقةَ التوءم مجددًا، لكن من منظور الزمكان هذه المرة. ينطلق التوءم المسافر بسرعةٍ تساوي ٨٠ بالمائة من سرعة الضوء، فيقطع أربع سنين ضوئية في خمس سنين، ثم يعود. ويمكننا بذلك تحديد ثلاثة أحداث رئيسية في القصة (انظر الشكل ٣-٣):

أ: يغادر التوءم المسافر الأرض

ب: يبدأ التوءم المسافر في رحلة العودة

ج: يعود التوءم المسافر إلى الأرض

وبمصطلحات الزمكان: ينتقل التوءم الماكثُ في الأرض من النقطة «أ» إلى النقطة «ج» في خطٍّ مستقيم. وينتقل التوءم المسافرُ من النقطة «أ» إلى النقطة «ب» في خطٍّ مستقيم، ومن النقطة «ب» إلى النقطة «ج» في خطٍّ مستقيم. وبناءً على هذا، فإنَّ الوقت



شكل ٣-٣: مفارقة التوءم: الوصف الهندسي.

الذي سجَّلته ساعة التوءم الماكثِ في الأرض يساوي الفاصل الزمني من النقطة «أ» إلى النقطة «ج»؛ وبالنسبة إلى التوءم المسافر، فهذا الوقت يساوي الفاصلَ الزمنيَّ من النقطة «أ» إلى النقطة «ب»، إضافةً إلى مسافة الزمكان من النقطة «ب» إلى النقطة «ج».

في الفضاء العادي، أقصرُ مسافة بين نقطتَين هو الخط المستقيم. لكن علامة السالب تقلب المسألةَ في زمكان منكوفسكي؛ إذ تصبح الخطوطُ المستقيمة هي المسافات الأطول بين نقطتَين في الزمكان (ينطبق هذا على النقاط المفصولة زمنيًّا على الأقل). ومن ثمَّ فإن

هندسة الزمكان في تصوُّر منكوفسكي تخبرنا بأن الوقت الذي مرَّ على التوءم الماكثِ في الأرض سيكون أطول.

يمكننا أن نزيد على ذلك بالفعل ونستخدم تعريفَ الفاصل الزمني لحساب الفَرْق الفعلي. فالفاصل من النقطة «أ» إلى النقطة «ج» — بالسنوات — يساوي الجذر التربيعي لـ ($١٠^{٢} - ٠^{٢}$)، أي ١٠ فقط، ومثلما نتوقَّع، فإنَّ التوءم الماكثَ في الأرض ينتظر عشر سنوات. أما الفاصل الزمني من النقطة «أ» إلى النقطة «ب» فهو الجذر التربيعي لـ ($٥^{٢} - ٤^{٢}$) أي ٣؛ فلم يمرَّ على التوءم المسافرِ سوى ثلاث سنوات قبل أن يبدأ رحلةَ العودة. وبالتناظر، فإن الفاصل الزمني من النقطة «ب» إلى النقطة «ج» هو أيضًا ٣؛ ومن ثمَّ فإن إجمالي الوقت الذي قاسه التوءم المتحرِّك يساوي ست سنوات؛ أي إنَّ سرعة مرور الوقت للتوءم المتحرِّك بلغت ٦٠ بالمائة فقط من سرعة مروره للتوءم الثابت.

إذن؛ تتنبأ هندسةُ الزمكان في تصوُّر منكوفسكي بأن الزمن المنقضي الذي سيسجِّله التوءم المسافر سيكون أقصرَ (لأن أطول مسار بين نقطتَين في الزمكان هو الخط المستقيم). ويوضِّح هذا انعدامَ التناظر في حالة التوءمَين ما يؤدي إلى حلِّ مفارقة التوءم (فعندما بدأ التوءم المتحرك رحلةَ العودة، أصبح مسار الزمكان الذي سيسلكه منحنيًا، لكنه ليس كذلك بالنسبة إلى التوءم الماكثِ في الأرض، مما سيؤثِّر في مسافة الزمكان). إضافةً إلى هذا، توفِّر لنا هندسة الزمكان في تصوُّر منكوفسكي طريقةً جاهزةً لحساب الفَرْق في الزمنَين بالنسبة إلى التوءمَين.

لكن هل «تفسِّر» هندسة الزمكان في تصوُّر منكوفسكي السببَ في أنَّ التوءم المتحرِّك يسجِّل زمنًا إجماليًّا أقصر؟ الحق أنَّ هذا السؤال تكرارٌ للمقارنة بين نهج الهندسة أولًا في مقابل نهج الديناميكا أولًا، والتي تناولناها في الفصل الثاني: هل هندسة الزمكان تفسيرٌ للظواهر الفيزيائية (لا سيما الفَرْق بين عمرَي التوءمَين) أم إنها تصنيف لتلك الظواهر فحسب؟ إذا كانت تفسيرًا للظواهر الفيزيائية، فسيكون من المنطقي أن نعتبر الوصف الذي طرحته فيما سبق تفسيرًا حقيقيًّا. أما إذا كانت محضَ تصنيف لتلك الظواهر، فإن هندسة الزمكان لا تقدِّم شيئًا سوى ترميز الحقائق بشأن التوءمَين، لكنها لا تذكر أسبابَ وقوع هذه الحقائق.

ولكي نتعرَّف على إجابةِ نهج الديناميكا أولًا عن هذا السؤال: ««لماذا» يسجِّل التوءم المتحرِّك زمنًا إجماليًّا أقصر؟» لِنرجع إلى الفكرة العامة لتمدُّد الزمن. رأينا بالفعل أن تمدُّد الزمن لا يتحدَّد جيدًا إلا بالنسبة إلى اختيارٍ محدَّد للإطار القصوري؛ ففي كل إطار،

تتقدَّم الساعات المتحركة ببطء. ومن منظورِ نهجِ الهندسة أولًا، فإنَّ هذا الاعتمادَ على الإطار يشكِّك في فكرةِ تمدُّد الزمن؛ فمفاهيمُ مثل «التحرُّك» و«البطء» ليس لها معنًى إلا أن تتناسب إلى إطار، ولا يمكن أن تُفهم في سياق البنية الثابتة للزمكان، ومن ثَم ينبغي ألَّا يكون لها دورٌ في التفسير. ومن هذا المنظور، فإن تأثيراتِ مفارقةِ التوءم هي بالفعل المحتوى الحقيقي لتمدُّد الزمن؛ فتباطؤ الساعة — خارج سياق سفر الساعة ثم رجوعها — مفهوم مفيد من الناحية الرياضية والحسابية، لكنه ليس جوهريًّا في الحقيقة.

لكن من منظورِ نهجِ الديناميكا أولًا، فحقيقة أن تباطؤ الساعة يتطلب إطارًا قصوريًّا لتحديده لا يجعل التباطؤ غيرَ حقيقي؛ فالأُطر القصورية هي الأساس الذي تُرسى عليه الفيزياء، ومن الطبيعي أن تُجرى التفسيرات الديناميكية في إطارٍ أو آخر. وعندما نقول عن أيٍّ من هذه الإطارات، إنَّ «الساعة المتحرِّكة تتباطأ فيه» أو ربما «يتقلَّص القضيب المتحرِّك»، فإننا نقصد أن العمليات الفيزيائية داخل القضيب، مثل الروابط الموجودة بين الذرَّات التي تحافظ على تماسُك القضيب وتحدِّد طوله، وأنَّ العمليات الدورية التي تحسبُ الوقت داخل الساعة؛ تختلف في المادة الواحدة حين تكون هذه المادة في حالة الحركة وحين تكون في حالة السكون. فعلى سبيل المثال، طبقًا لقوانين الكهرومغناطيسية، فإن المجال الكهربي للشحنة المتحرِّكة يتضاءل في اتجاه الحركة مقارنةً بمجال الشحنة الساكنة. إنَّ المجالات الكهربائية هي ما يحافظ على تماسُك المادة العادية؛ ومن ثمَّ فمن المتوقَّع أن يتغيَّر شكل تلك المادة إذا تغيَّرت هذه المجالات بالحركة.

على الرغم من هذا المثالِ الملموس المتعلِّق بالمجال الكهرومغناطيسي، فلسنا بحاجة في الحقيقة إلى دراسة الفيزياء الدقيقة التفصيلية للساعات أو القضبان؛ كي نتنبأ بتمدُّد الزمن وتقلُّص الطول. فكلُّ ما نحتاج إلى معرفته هو أنَّ القوى التي تؤدي إلى تماسك هذه المواد معًا، هي جميعًا ما يحدِّد الخصائصَ الفيزيائية التي تتسق مع مبدأ النسبية، وتوفِّر سرعةَ ضوءٍ مستقلة عن السرعة المتَّجهة. وهذا يشكِّل قيدًا صارمًا بما فيه الكفاية على صيغة القوانين، لضمانِ أنه إذا كانت هذه القوانين تصف الأجسامَ الصلبة والساعات الدقيقة أصلًا، فإن تلك الأجسام والساعات ستتطابق مع مبدأ النسبية حين تكون في حالة حركة.

بناءً على هذا التفسير — فعلى خلافِ ما يحدُث في حالة نهج الهندسة أولًا — سجَّل التوءم المتحرِّك زمنًا أبطأ؛ لأنه كان يتحرَّك على مدار الفترة، وفي هذه العمليةِ تباطأت ساعاتُه بسببِ تأثُّر عملياتها الفيزيائية الداخلية بالحركة. كيف يتحاشى هذا التفسير

جانبَ المتناقض في مفارقة التوءم؟ فمن وجهةِ نظر التوءم المتحرِّك، وعلى الرغم من كل شيء، فإن التوءم الماكثَ في الأرض هو الذي يتحرك!

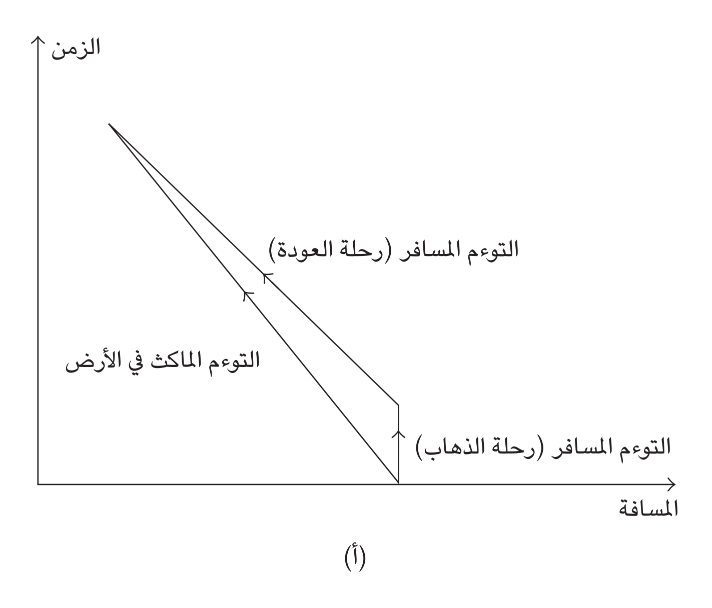
الإجابة هي أنه على الرغم من إمكانيةِ تقديم تفسيرات ديناميكية لأي إطار قصوري، فإن الإطار الذي يتحرَّك بالسرعة نفسِها التي يتحرَّك بها التوءم المتحرِّك، ليس إطارًا قصوريًّا؛ لأن التوءم يستدير ليبدأ رحلةَ العودة. يمكننا تحديدُ إطارَين قصوريَّين وثيقَي الصلة وهما: «إطار الذهاب» الذي تتزامن حركته مع التوءم حتى نقطةِ العودة، و«إطار العودة» الذي تتزامن حركته مع التوءم بعد نقطة العودة. (انظر الشكل ٣-٤.)

في إطار الذهاب (الشكل ٣-٤(أ))، يتحرَّك التوءم الماكثُ في الأرض بسرعةٍ ثابتةٍ تساوي ٨٠ بالمائة من سرعة الضوء. وعند نقطة العودة، يصبح التوءم «المتحرك» ثابتًا، لكنه حالما يبدأ رحلةَ العودة، فإنه يتحرك بسرعة كبيرة (تساوي ٤٠ / ٤١ من سرعة الضوء في الحقيقة)، وهي سرعةٌ أكبر حتى من سرعة التوءم الماكثِ في الأرض.

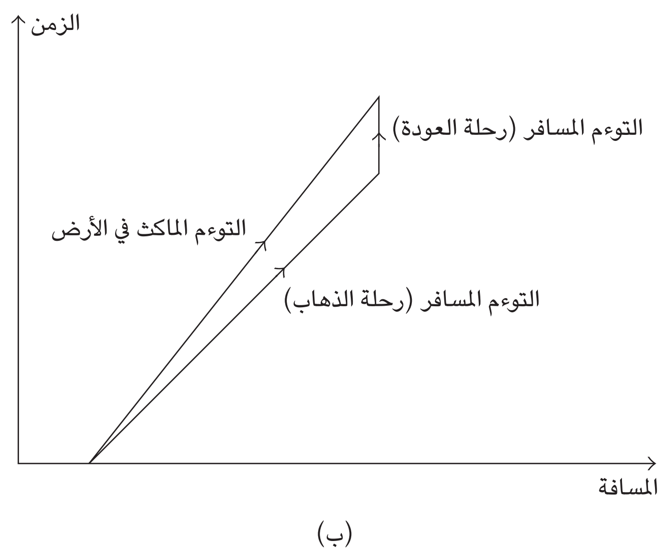
إذن، تُوصف مفارقةُ التوءم في إطار الذهاب كما يلي: تبطئ ساعة التوءم الماكثِ في الأرض مقارنةً بالساعة الثابتة. لا تبطئ ساعة التوءم المتحركِ في البداية، لكنها بعد نقطة العودة، تبطئ بدرجةٍ أكبرَ من ساعة التوءم الماكثِ في الأرض، حتى إنَّ التوءمَ المتحرك يسجِّل زمنًا إجماليًّا أقلَّ مما يسجِّله التوءم الماكث في الأرض. وعلى النقيض من ذلك، في إطار العودة (الشكل ٣-٤(ب))، فإن ساعة التوءم المتحرِّك تبطئ في البداية للغاية مقارنةً بالساعة الثابتة، ثم تتقدَّم بسرعتها العادية، بينما تتقدَّم ساعة التوءم الماكثِ في الأرض ببطء نوعًا ما على مدارِ الوقت بأكمله. في كلٍّ من هذه الحالات، يكون لدينا تفسيرٌ فيزيائيٌّ ديناميكيٌّ لقياسات الزمن المتباينة لدى التوءمَين، من حيث تأثير الحركة في العمليات الفيزيائية، لكن هذا التفسير مُختلِف في كل إطار قصوري.

وتلخيصًا لما ذكرناه، نورِد فيما يلي مسألةَ تمدُّد الزمن وفقًا لنهج الهندسة أولًا:

- الفجوة الزمنية في مفارقة التوءم تأثيرٌ فيزيائي حقيقي تفسِّره حقيقةُ أن التوءم المتحركَ يسلك مسارًا أطولَ عَبْر الزمكان.
- على العكس من ذلك، فإن الحديث عن «تباطؤ» الساعات هو مفهومٌ يعتمد على الإطار المرجعي، وليس له وصفٌ ثابتٌ في الزمكان وينبغي تجنُّبه.
- تختفي مفارقةُ تمدُّد الزمن حالما نلاحظ أنَّ مسار التوءم المتحرِّك منحنٍ، في حين أن مسار التوءم الماكثِ في الأرض مستقيم.



(أ)



(ب)

شكل ٣-٤: مفارقة التوءم: وصف الإطار القصوري.

- يُطرَح التفسير الحقيقي لظواهر الزمكان طرحًا مثاليًّا، بالإشارة إلى الزمكان مع تجنُّب الإشارة إلى الأطر القصورية.

في نهج الديناميكا أولًا:

- الساعات المتحركة تبطئ بالفعل، نتيجةً للعمليات الفيزيائية التي تحدِّد ضبط الوقت، وتأثير الحركة في تلك العمليات الفيزيائية.
- يمكن تفسيرُ مفارقة التوءم — في أي إطار قصوري — بتباطؤ العمليات الفيزيائية للأجسام المتحركة بالنسبة إلى ذلك الإطار.
- تتلاشى مفارقةُ تمدُّد الزمن حالما نلاحظ أن التوءم الماكثَ في الأرض ثابتٌ بالنسبة إلى إطارٍ قصوري غير متغيِّر، بينما لا يوجد إطار قصوري يكون التوءم المتحرك ثابتًا بالنسبة إليه على مدارِ رحلته.
- من الجيد تفسيرُ ظواهر الزمكان بالنسبة إلى إطارٍ قصوري محدَّد؛ لأن الديناميكا تتحدَّد بالنسبة إلى تلك الأُطر، وإن كان مبدأ النسبية يعني أنَّ أيَّ تفسيرٍ ينبغي أن يكون متاحًا، بالقَدْر نفسه لأي إطار قصوري آخر.

إنَّ المجال في هذا الكتاب لا يتَّسع إلا لطرح هذه الثنائية، وليس حلَّها، وهي أعقدُ بالطبع وأدقُّ بدرجةٍ أكبرَ مما يمكنني تناوله هنا؛ إذ إنها لا تخلو من نسخٍ وسيطةٍ ومركَّبة من النهجَين. وعلى الرغم من أن رياضيات النسبية الخاصة قديمةٌ ومفهومة جيدًا، تظل هذه الأسئلة التأويلية بشأن النظرية مفتوحة، يكتب الفلاسفة وعلماء الفيزياء عنها ويفكِّرون فيها بطرقٍ مختلفة تمامًا.

خاتمة: النسبية العامة

إنَّ نظرية النسبية العامة لأينشتاين — والتي صاغها بعد عَقد أو نحو ذلك من النسبية الخاصة — من الموضوعات المركزية في الفيزياء الحديثة وفي الفلسفة الحديثة للزمكان، لكن التعقيد الفني للنظرية يجعل تناولَ الألغازِ المفاهيمية العميقةِ التي تطرحها خارجَ سياق هذا الكتاب. على الرغم من ذلك، يمكننا البناءُ على ما تعلَّمناه في هذَين الفصلَين الأخيرَين لفَهْم الفكرة الأساسية للنظرية على الأقل.

يمكن القول على وجهِ التحديد، إنَّ النسبية العامة تَدمُج بين الاكتشافات المتعلِّقة بالقصور الذاتي والجاذبية التي تناولناها في نهايةِ الفصل الثاني، وبين الاكتشافات الخاصة بالبنية القصورية وآثار مبدأ النسبية التي تشكِّل النسبية الخاصة. تذكَّر أنَّ الطبيعة العامة للجاذبية تخبرنا بأن البنية القصورية لا تقدَّم على أنها خلفيةٌ غير متغيِّرة على نطاقِ الكون بأكمله، بل إنها تتحدَّد محليًّا عن طريقِ توزيع المادة. ومن ثمَّ تُفهم الجاذبية في سياقِ انحناء الزمكان؛ أي من خلالِ كيفية ارتباط الأطر القصورية المحلية في مكانٍ ما بالأطر الأخرى في الأماكن القريبة.

في جاذبية نيوتن، فيزياء هذه الأطر القصورية المحلية هي فيزياء نيوتن. وتظهر النسبية العامة بطريقةٍ طبيعية من الناحية الرياضية وفريدة تقريبًا، حين نبقي على فكرةِ الجاذبية ونستغني عن مفهوم نيوتن للإطار القصوري، لنستخدم بدلًا منه المفهومَ الذي ينتج من النسبية الخاصة.

(على الرغم من ذلك، ثمَّة تغييرٌ مهم يظهر عند دمْج النسبية الخاصة مع الجاذبية. فمثلما أنَّ اصطلاح التزامن كان يعني عدمَ إمكانية الفصل بين بنية المكان وبنية الزمان فصلًا كاملًا، فإنه يعني أيضًا أنه لا يمكن أن توجَد نظريةٌ لانحناء الزمكان من دون أن تكون أيضًا نظرية لانحناء المكان. أما ما يعنيه هذا، وما هي تداعياته على الأسئلة الواردة في هذا الفصل والفصل الأخير، فهو خارج نطاق هذا الكتاب.)

حين نفهم النسبيةَ العامة بهذه الطريقة، فإننا نحظى أيضًا بلمحةٍ لما كانت عليه عبقرية أينشتاين. إنَّ عبقريته لا تقتصر على توصُّله إلى أفكارٍ جديدة؛ فالأفكار متاحة في واقع الأمر. وإنما عبقريته أنه فهِم بعض سمات الفيزياء الحالية — سواء مبدأ النسبية أو العلاقة بين الجاذبية والقصور الذاتي — فهمًا أعمقَ مما فهِمها سابقوه. لم يستغنِ أينشتاين عن نظريةِ نيوتن للجاذبية، ليضعَ مكانها نظريةً تتعلَّق فيها الجاذبية بانحناء الزمكان، بل إنه أدرك أن نظريةَ نيوتن عن الجاذبية هي «بالفعل» نظريةٌ عن انحناء الزمكان، ثم توصَّل إلى الشكل الذي ستبدو عليه النظريةُ إذا تغيَّر مفهومها المحلي عن القصور الذاتي على النحو الملائم.

تلك على الأقل، هي الطريقةُ التي يمكننا أن نفكِّر بها في النسبية العامة، إذا ركَّزنا على فكرةِ البنية القصورية والأطر القصورية. وثمَّة طريقةٌ مختلِفة لفهم النظرية: سنبدأ بالزمكان في تصوُّر منكوفسكي، ثم نسأل كيف يمكن تغييرُ النظرية لجعلِ الفاصلِ الزمكاني، أو المسافة الزمكانية كِيانًا ديناميكيًّا يعتمد على توزيعِ مادة الزمكان، ويتفاعل

معها مرةً أخرى. تؤدي هذه الطريقةُ في التفكير بشأن النظرية إلى السمات الرياضية نفسها، لكنها تؤدي إلى فَهْم السمات الفيزيائية فهمًا مختلفًا بدرجةٍ كبيرة؛ إذ تتوسَّع الأسئلة التأويلية العميقة الواردة في هذا الفصل والفصل الأخير في النسبية العامة، حتى مع تحوُّلها وزيادة تعقيدها في السياق الرائع والدقيق لأفضلِ نظريةٍ معاصرةٍ عن الجاذبية.

على الرغم من أنه لا يزال يوجد الكثير مما يمكن قوله عن فلسفة المكان والزمان، فسوف نغيِّر تركيزنا الآن. فلن نتناول في الفصل الرابع أيَّ نظرية محدَّدة في الفيزياء، بل سنتناول العلاقةَ بين نظريات متعدِّدة على مستويات متعدِّدة من الوصف؛ أي إننا سنتناول مجالَ الميكانيكا الإحصائية.

الفصل الرابع

الاختزال وعدم القابلية للانعكاس

يمكن القول إن الكيمياء الحديثة تبدأ باكتشاف «الجدول الدوري»، في القرن التاسع عشر، والذي يتمثَّل في اكتشافِ إمكانية تصنيف العناصر الكيميائية إلى مجموعات، بحيث يتيح موضعها في المجموعة التنبؤَ ببعض خصائصها. وبدأت كيمياء «الكم» الحديثة بالاكتشافات البالغة الأهمية التي وقعت في القرن العشرين، بأنه يمكن التنبُّؤ ببنيةِ تلك المجموعات وكذلك الخصائص الكيميائية لعناصرها بالطبع، من خلال فيزياء الإلكترونات والبروتونات والنيوترونات التي تتألَّف منها هذه العناصر مثلما تعلَّمنا.

تشكِّل هذه الاكتشافات مثالًا من أوضحِ الأمثلة على «الاختزال» في العلوم، وهو ما يحدث حين يفسَّر النظامُ الأكبر من خلال مكوِّناته الأصغر، وحين يتبيَّن أن الأفكار في ذلك المجال العلمي الذي يتعامل مع ذلك النظام الأكبر، يمكن تحليلها عَبْر أفكار المجال العلمي الذي يتعامل مع المكوِّنات الأصغر؛ وفي هذه الحالة، تفسَّر الذراتُ من خلال الجُسَيمات دون الذرية، وثمَّة «جزء من» الكيمياء الذرية يفسَّر من خلال الفيزياء، أو يمكن القول إنه «يُختزل» إلى الفيزياء، على حدِّ تعبير الفلاسفة. تتمثَّل الاختزالية — للوهلة الأولى على الأقل — في فكرةِ أن مثلَ تلك الاختزالات هي القالب لجميع العلاقات بين النظريات العلمية، وأن المفاهيم العلمية والنظريات ذات المستوى الأعلى والنطاق الأكبر ستُختزل إلى نظرياتٍ ذات مستوًى أقلَّ ونطاقٍ أصغر، وسيتأسَّس كلُّ شيء على الفيزياء في نهاية المطاف.

زاد الحماسُ للاختزالية في النصف الأول من القرن العشرين، وقد رافقه في بعض الأحيان موقفٌ رافض من علماء الفيزياء لما يطلق عليه «العلوم الخاصة» ذات المستوى الأعلى؛ ويتجسَّد هذا الموقف في تعليقٍ (ربما يكون ملفَّقًا) يُنسب إلى عالِم الفيزياء إرنست رذرفورد، يقول فيه: «العلوم كلُّها فيزياء، وإلا فهي جَمْع طوابع فحسب». غير أنَّ السنوات التالية لذلك شهدت ردةَ فعلٍ عنيفةً تجاه الاختزالية، مدفوعةً في ذلك بملاحظاتٍ عن تعقيد

العلوم الخاصة واستقلاليتها، وكذلك عدم توافق تفاصيل الفيزياء مع سمات هذه العلوم الخاصة، إضافةً إلى المخاوف المستمرة المتعلِّقة بسمات التجربة البشرية — (التي يُفترض) أنها غيرُ قابلةٍ للاختزال جوهريًّا — مثل الألم والوعي، وغيرها أيضًا من السمات. وفي الوقت الراهن، يشيع القول إن العلوم ذات المستوى الأعلى «ناشئة» من الفيزياء، وليست «مختزَلة» إليها، ولا تزال العلاقةُ الدقيقة بين مفهومَي النشوء والاختزال محلَّ خلاف.

قد لا يبدو أنَّ لهذا صلةً كبيرة بالفيزياء. ذلك أنه إذا كانت الفيزياء هي العلم الذي تُختزل إليه العلوم الأخرى، وإذا كانت الفيزياء — بغضِّ النظر عن علاقتها بالعلوم الأخرى — هي المجال الذي يدرُس المادةَ على أصغرِ نطاقاتها وأكثرها جوهرية، فستبدو الاعتبارات الخاصة بالنشوء والاختزال للوهلة الأولى غيرَ ذات صلة بالفيزياء في حد ذاتها. لكن الحقيقة أنَّ جزءًا صغيرًا من الفيزياء هو ما يهتم فعلًا بدراسة «النطاقات الأكثر جوهرية». فمعظمُ الأنظمة التي يدرُسها علماء الفيزياء — أنوية الذرات، والمعادن، والبلازما، والمناخ، والمجرات — هي نفسها معقَّدة، كما أنها أنظمةٌ كبيرة النطاق وعلاقاتها بالفيزياء المنخفضة المستوى معقَّدة وغير مباشرة. وبناءً على هذا، فإن فَهْم الاختزال — وبشكلٍ أعم، العلاقة بين النظريات التي تقع على مستوياتٍ مختلفة — هو في حقيقة الأمر قضيةٌ مفاهيمية رئيسية لعلم الفيزياء ولفلاسفة الفيزياء. وسنرى أنه حتى في الفيزياء، فإن الاختزال مسألةٌ دقيقة وتتطلَّب مفاهيمَ جديدة تمامًا تتجاوز القوانين الديناميكية الأساسية في الفيزياء؛ ومنها مفهوم «عدم القابلية للانعكاس» ومفهوم «الاحتمالية». لقد دخل المفهومان إلى الفيزياء في القرن التاسع عشر، لكنهما لا يزالان محلَّ جدال حتى يومنا هذا.

نظرة في تعدُّدية الفيزياء

كثيرًا ما يجري الحديث عن «قوانين الفيزياء» وكأنه توجد مجموعةٌ واحدة من المبادئ، أو مجموعة واحدة من المعادلات تجسِّد محتوى الفيزياء. الحق أنني استسلمت لهذا الإغراء في الفصلَين الثاني والثالث؛ إذ أشرت إلى قوانين نيوتن وكأنها قد وصفت علم الفيزياء ما قبل النسبية وصفًا كاملًا، ولم تحلَّ محلَّها قوانينُ النسبية إلا قبل قرن أو نحو ذلك. لكن واقع الأمر أن الفيزياء تضم عشرات القوانين المختلِفة، بل المئات منها، وكذلك المئات من أنظمة المعادلات المختلفة، التي تصِف أنظمةً مختلفة على نطاقاتٍ مختلفة من الوصف.

فعلى سبيل المثال، إضافة إلى معادلات ميكانيكا نيوتن (التي تفيد مثلًا في وصفِ كيفية حركة الأجسام تحت تأثير الجاذبية):

- تصف «معادلة نافيير–ستوكس» الموادَّ السائلة والغازية على المستوى الذي يمكن اعتبارها متصلة فيه وقابلة للقسمة بلا حدود؛
- تصف «معادلة بولتزمان» الغازات المخفَّفة، وذلك على مستوًى أدقَّ إلى حدٍّ ما؛
- تصف «معادلات أويلر» سقوطَ الأجسام الصلبة؛
- تصف «معادلات ماكسويل» كيفيةَ تطوُّر المجالات الكهرومغناطيسية.

إضافةً إلى ذلك، فإنَّ هذه المعادلات تَصِف العديدَ من الأنظمة المختلفة في معظم الحالات. لكن تطبيق القانون يتطلب أعدادًا حقيقية معينة — مثل لزوجة سائلٍ ما أو كتلة كوكبٍ ما — وتتفاوت هذه الأرقام من تطبيق إلى آخرَ. (فمن جانبٍ ما، المعادلات التي تَصِف نظامَ الأرض–القمر هي «نفسها» التي تَصِف نظامَ الشمس–المشتري، لكن بقيمٍ مختلِفة لكتلتَي الكوكبَين). في الحقيقة، ينبغي ألا نرى الفيزياءَ على أنها تقدِّم وصفًا واحدًا للعالَم، بل على أنها تقدِّم أوصافًا متعدِّدة لأنظمةٍ متعدِّدة على مستويات مختلِفة.

على الرغم من ذلك، فليست هذه الأوصافُ مستقلةً بعضها عن بعض. وفي كثيرٍ من الأحيان، يمكننا وصفُ النظام الواحد بالكثيرِ من التفاصيل أو بالقليل منها، ثم نحاول فَهْمَ كيفية ارتباط كلٍّ من هذَين الوصفَين بالآخر. سيفيدنا في هذا المقام أن نذكرَ مثالًا ملموسًا على هذه الحالة؛ لذا سنتحدَّث عن الغازات؛ عن هواء الغرفة التي أكتب فيها هذا الكتاب تحديدًا. يوجد حوالي ألف تريليون تريليون جزيء من الهواء في الغرفة؛ أي $١٠^{٢٧}$ بالترميز العلمي. ومن حيث المبدأ، فإن معرفةَ موضعِ كلٍّ من الجزيئات البالغِ عددها $١٠^{٢٧}$ في الوقت الحالي والسرعة المتَّجهة لكلٍّ منها (أي ٦×١٠^{٢٧} بالأرقام: المكوِّنات x وy وz التي تعبِّر عن موضعِ كل جزيء والسرعة المتَّجهة) سيكفي للتنبؤ بما ستفعله هذه الجزيئات في المستقبل.

على الرغم من ذلك، فليست تلك هي الطريقةَ التي ندرُس بها الغازات في الواقع العملي. فيما يلي وصفٌ بديل: بدلًا من تقديم كلِّ الأعداد ٦×١٠^{٢٧}، فإننا نطرح وصفًا تقريبيًّا للغاز؛ كأن نقسم الغرفةَ إلى خلايا بسعة ١ ملِّيمتر مكعب، إضافة إلى توفيرِ نِسبِ كلٍّ من الضغط والكثافة ودرجة الحرارة ومتوسط السرعة المتَّجهة للغاز في كل مكعب.

لا يزال هناك الكثيرُ من المعلومات التي أحتاج إليها؛ فأنا أحتاج تقريبًا إلى مائة مليون، أو $١٠^{٨}$ من الأعداد كي أذكرَ ذلك القدْر من المعلومات عن الغاز، لكن العدد $١٠^{٨}$ أصغرُ بكثير من العدد $١٠^{٢٧}$. عند هذا المستوى من الوصف، فأنا لم أعُد أناقش موضوعَ الغاز باعتباره مجموعةً من الجُسَيمات، بل باعتباره مائعًا متدفقًا إلى حدٍّ ما. (ومع قَدْر من حسن الحظ، يتضح أن نمطَ التباين بين تلك الأعداد سلِسٌ عَبْر الغرفة إلى حدٍّ ما؛ ومن ثَمَّ يمكنني تلخيصها بطريقةٍ أكثرَ إيجازًا بدرجة كبيرة.)

الهدف الآن هو البحثُ عن وصفٍ «مستقل» للغاز عند هذا المستوى من الوصف. وما أقصده بكلمة «مستقل» هنا هو أنني إذا أردت معرفةَ وصف الغاز على مستوى الموائع بعد خمس دقائق (على سبيل المثال)، فسيمكنني استنتاجُه من الوصف على مستوى الموائع في الوقت الحالي. بمعنًى آخر: لمعرفة مدى تغيُّر الأعداد $١٠^{٨}$ بمرور الوقت، فأنا لست بحاجةٍ إلى القيم المبدئية المتمثِّلة في الأعداد: ٦×١٠^{٢٧} التي تحدِّد موضعَ كل جسيم وسرعته المتجهة، وإنما أحتاج فقط إلى الأعداد $١٠^{٨}$ التي تعطي الوصف الحالي على مستوى الموائع.

يبدو أنه يتوافر لدينا ذلك الوصفُ العام غير التفصيلي في هذه الحالة على الأقل؛ وهو مثالٌ على معادلة نافيير–ستوكس المذكورةِ بإيجازٍ فيما سبق. (توفِّر الأوصاف التقريبية المختلفة معادلاتٍ غير تفصيلية؛ على سبيل المثال، يمكن الحصول على معادلة بولتزمان بهذه الطريقة.) وليس من السهل التعامُل مع هذه المعادلات في حد ذاتها، ولا يزال العدد $١٠^{٨}$ كبيرًا رغم كل شيء، لكن في الظروف المواتية يمكننا إما حلُّ هذه المعادلات مباشرةً أو معرفةُ أشياءَ عامة عنها على أي حال. ونظرًا لأهمية هذا المثالِ، تتنبأ هذه المعادلات بأن الغاز سيصل في الوقت المناسب إلى حالةٍ من التجانس التام، حيث تكون نسبة كلٍّ من الضغط والكثافة ودرجة الحرارة ثابتةً عَبْر الغرفة، وحين يصل إلى هذه الحالة، يرتبط متوسطُ درجة الحرارة والضغط والكثافة بمعادلةٍ بسيطة تسمَّى «قانون الغاز المثالي». في هذه المرحلة، فإننا لا نهتم بالأعداد: ٦×١٠^{٢٧} ولا بالعدد $١٠^{٨}$، بل نهتم بالقيم العددية لعواملَ ثلاثةٍ — الضغط والكثافة ودرجة الحرارة — فحسب.

إنَّ البحث عن أوصافٍ مستقلة عامة غير تفصيلية من هذا النوع مهمةٌ تندرج ضمن علم «الميكانيكا الإحصائية»، وقد سمِّي هذا العلمُ بهذا الاسم؛ لأن إعطاء أوصافٍ عامة للأنظمة عادةً ما يتضمَّن التوصُّل إلى متوسط الخصائص الإحصائية لمكوِّناتها الأصغر. وقد حقَّقت هذه المسألة نجاحًا كبيرًا منذ بدايتها في أواخر القرن التاسع عشر، ولكنها

تثير تساؤلاتٍ عميقةً للغاية لا تزال قائمة حتى يومنا هذا. التساؤل الأول والأبسط هو: لماذا نحتاج إلى هذه «الأوصاف المستقلة العامة غير التفصيلية» على أي حال؟ وإذا كان بإمكاننا وصفُ المادة الغازية بكل تفاصيلها المجهرية، فلماذا نكتفي بوصف جزئي؟

من الإجابات الشائعة عن هذا السؤال — لا سيما في كتب الفيزياء الدراسية — أن الميكانيكا الإحصائية ضروريةٌ بسبب حدودنا الإدراكية والتجريبية. ما يُقصَد بهذا أننا لا نمتلك القدرةَ في الواقع على قياس الموضع المحدَّد لكل جسيم بمفرده، وحتى إذا امتلكنا تلك القدرة، فمن الصعب للغاية أن نحلَّ المعادلات لحسابِ كيفية تغيُّر القيم بمرور الوقت. لو أننا كنا أذكى من ذلك وكانت لدينا أجهزةٌ أفضل، لاستطعنا التخليَ عن الميكانيكا الإحصائية بالكامل.

ومن الحجج التي يمكن ذِكرها في هذا السياق أننا لا «نهتم» إلا بسماتٍ معيَّنة في النظام. فنحن لا نهتم بالقيم الدقيقة لموضعِ جميع الجسيمات وسرعتها المتجهة، إنما يقتصر اهتمامنا على التلخيصات التقريبية لمواضعِ تلك الجسيمات وسرعاتها المتَّجهة؛ ومن ثَم فإن الميكانيكا الإحصائية تتيح لنا استخراجَ المعلومات التي نحتاجها عن سِمات النظام التي نريد أن ندرُسها بالفعل، دون أن تشتِّتنا التفاصيل غيرُ المهمة.

لكنَّ ثمَّة أسبابًا تدعو إلى التشكيك في أن هذه هي القصةُ كاملة. فعلى الرغم من كل شيء، يبدو أنَّ ثمة «حقيقة» عن العالم؛ حقيقةً نود تفسيرها وفَهْمها تتمثَّل في أن الموائع تخضع لمعادلة نافيير-ستوكس، أو أن قانون الغاز المثالي ينطبق على الغازات التي بلغت حالةَ التجانس واستقرَّت عليها، وإضافةً إلى ذلك يبدو أنَّ هذه الحقائق قد اكتُشفت قبل تحليلها عَبْر الميكانيكا الإحصائية بفترة طويلة. حتى إذا كانت لدينا القدرة الحسابية والتجريبية على التنبؤ الدقيق — في ظل معرفة الحالة الأولية — بكيفية تطوُّر نظامٍ ما مثل الهواء في غرفتي، فلا يبدو أن هذا وحدَه يخبرنا بسبب وجود الوصف المستقل العام غير التفصيلي، أو ماهيته. (أقصى ما يمكن أن يخبرنا به الوصف الدقيق للهواء في الغرفة على المستوى المجهري؛ أنَّ قانون الغاز المثالي ينطبق على هذا التشكيل للجزيئات، لكنه لا يخبرنا بما إذا كان من المتوقَّع أن ينطبق على تشكيلات الجزيئات بشكلٍ عام.)

إضافةً إلى ذلك، يبدو أنَّ دورَ الاهتمام البشري مُغالًى في تقديره في هذا المقام. لست في حقيقةِ الأمر مهتمًّا بهواء هذه الغرفة، إلا فيما يتعلق بالشروطِ الأساسية الخاصة بقابليته للتنفُّس، لكن على الرغم من افتقاري المؤسف إلى الفضول، فلا تزال هناك حقيقةٌ موضوعية تفيد بوجودِ أوصاف مستقلة غير تفصيلية بشأن ذلك الهواء. على العكس من

ذلك، توجد سمات فردية في العالم أهتمُّ بها اهتمامًا كبيرًا، ومنها على سبيل المثال أرقامُ المبيعات الخاصة بهذا الكتاب. لكني لا أستطيع أن أفهمَ كيفيةَ تغيُّر معظمِها بمرور الوقت من دون معرفة الكثير عن السمات الأخرى الأقلِّ إثارةً للاهتمام، لا توجد ديناميكيات مستقلة لأرقام المبيعات الخاصةِ بكتابي! ومهما يكن ذلك الذي يجعل بعضَ السمات التقريبية قابلةً للوصف بشكلٍ مستقل، وعُرضة للتأثُّر بطرائقِ الميكانيكا الإحصائية، ولا يجعل بعض السمات الأخرى كذلك، فهو ليس شيئًا بسيطًا مثل «ما يهتم به البشر».

ما نراه هنا هو خلاف بين تصوُّرَين مختلفَين عن الميكانيكا الإحصائية. في التصوُّر «الاستدلالي»، الميكانيكا الإحصائية أداةٌ للاستدلال تُستخدم لدراسة الأنظمة المعقَّدة في مواجهة معرفتِنا الجزئية والاهتمام المتفاوت. وفي التصوُّر «الديناميكي»، تتعلق الميكانيكا الإحصائية بفَهْم الأوصافِ العامة غير التفصيليةِ المتنوِّعةِ الصحيحةِ موضوعيًّا الخاصةِ بالظواهر المعقَّدة وفَهْمها، وكذلك تعلُّم كيفيةِ ربطِ هذه الأوصاف بعضها ببعض. ووفقًا لهذا التصور، تُعَد الميكانيكا الإحصائية هي ببساطةٍ الأداةَ التي تستخدمها الفيزياء لدراسة الانبثاق. ونظرًا للأسباب الموضَّحة، فأنا أكثرُ ميلًا للتصور الديناميكي، وقد كُتب معظمُ هذا الفصل انطلاقًا من هذا المنظور، لكن كِلا التصورَين يطرحان رؤًى مميزة، وربما يكون الواقع أعقدَ مما يسمح بإمكانية الاختيار بينهما.

على الرغم من ذلك، فأيًّا كان المنظور الذي نختاره، ستوجد ألغازٌ عميقة بشأنِ كيفية استخلاص الأوصاف العامة غير التفصيلية التي نستخدمها بالفعل، من فيزياءَ تفصيلية. ويبدو في الواقع أنه توجد حججٌ منطقية بالفعل تفيد أنه يستحيل ذلك، وأن الأوصاف العامة غير التفصيلية لها سمات — سمتان على وجه التحديد وهما عدم القابلية للانعكاس والاحتمالية — وهذه السِّمات من حيث المبدأ لا يمكن استخلاصها من المستوى المجهري. في بقية الفصل، سنتعرَّف هذه السمات، ونتعلَّم أيضًا كيف يمكننا، على الرغم من كل شيء، تجنُّب التناقضات الواضحة التي تؤدي إليها في نهاية الأمر.

القابلية للانعكاس وعدم القابلية للانعكاس

تخيَّل أنك تشاهد مقطعَ فيديو مسرَّع للأرض وهي تدور، أو الأقمار والكواكب في المجموعة الشمسية وهي تدور حول بعضها بعضًا؛ فهل تستطيع أن تحدِّد إن كان الفيديو يسيرُ بالعكس أم لا؟ نعم، ربما، إذا تذكَّرت بعضَ المعلومات عن مراحل القمر أو تذكَّرت أن الشمس تطلُع من الشرق وتغرُب في الغرب، لكن المسألة تحتاج إلى التفكير. ما من شيء

سيبدو «خطأً على الفور» بشأنِ الفيديو إذا كان يسيرُ بالعكس، فلا شيء «واضح» يدل على أن هناك خطأً ما. فحركةُ الكواكب تبدو واحدةً في الأساس، سواء كانت تسيرُ إلى الأمام أو بالعكس.

والآن، كرِّر الخدعةَ نفسَها مع كومةِ رمال تنهار، أو مع مزْجِ الحليب بالقهوة، أو ذوبان الثلج (مع زيادة السرعة)، أو نموِّ الكائنات الحية وتحلُّلها. في هذه الحالة، يغدو واضحًا تمامًا إن كان الفيديو يسيرُ بالعكس أم لا؛ فهناك سِمات فورية لكل هذه العمليات تخبِرنا باتجاه تقدُّم الفيديو.

المصطلح التقني الذي يُطلَق على هذه العمليةِ هو «القابلية للانعكاس». فحركاتُ الكواكب قابلةٌ للانعكاس، أما انهيار كومة الرمال وذوبان الثلج فهما عمليتان غير قابلتَين للانعكاس. وحقيقةُ أن بعض العمليات الديناميكية قابلةٌ للانعكاس وبعضها غير قابل للانعكاس تطرح صعوباتٍ عميقةً في الميكانيكا الإحصائية.

لإدراك ذلك، لِنتطرق إلى المعنى الدقيق لمصطلح القابلية للانعكاس. سنبدأ بتصوُّر قوانين الديناميكا في الفيزياء باعتبارها أجهزةً للتنبؤ بالمستقبل؛ إذا أدخلت الحالةَ الحالية للنظام الذي تنطبِق عليه هذه القوانين، فسيعطي الجهازُ الحالةَ التي سيصبح عليها النظام في غضون ثانية أو في غضون ساعة. بالنسبة إلى الهواء في الغرفة على سبيل المثال، إذا أدخلت مواضعَ كل الجسيمات في الوقت الحالي وسرعاتها المتجهة، فستحدِّد القوانين مواضعَ الجسيمات وسرعاتها المتَّجهة في أي وقتٍ مستقبلي يعنيك، لكن ذلك على افتراض عدم وجود أيِّ تدخلات خارجية مؤثِّرة. وفي حالة المجموعة الشمسية، ففور تحديدِ مواضعِ الكواكب في الوقت الحالي وسرعاتها المتجهة، فإنَّ هذا يكفي لتحديد تلك المواضع والسرعات المتجهة في المستقبل؛ ويمكننا استخدامُ هذه القوانين للتوصُّل إلى تواريخ الكسوف الشمسي في المستقبل على سبيل المثال. وعلى الرغم من أنَّ حلَّ معادلات الحركة لمزْجِ الحليب مع القهوة أمرٌ في غاية التعقيد والصعوبة، فمن حيث المبدأ، إذا أدخلت البيانات المبدئية عن الجزء المملوء بالقهوة في الفنجان والجزء المملوء بالحليب، فستمكنك هذه البيانات أيضًا من التنبؤ بتلك الحقائق في أي وقتٍ في المستقبل. كل القوانين التي تناولناها حتى الآن حتميةٌ، مما يعني أن أي مدخلات محدَّدة ستعطي مخرجاتٍ فريدة في كل وقت محدَّد في المستقبل.

يتجسَّد جوهر الانعكاس في أنَّ كل القوانين الانعكاسية يمكن استخدامها من أجل التنبؤ بالماضي، أو للاستنتاج الرجعي كما يطلِق عليه الفلاسفة في بعض الأحيان. فحركة

الكواكب قابلةٌ للانعكاس، أي إنه يمكن استخدامُ البيانات الحالية عن الكواكب بمنتهى السهولة؛ لتحديدِ ظواهر الكسوف في الماضي وفي المستقبل. (هذه المسألة مهمة في التاريخ القديم على سبيل المثال؛ فمعرفة المواعيد الدقيقة لظواهر الكسوف والخسوف التي حدثت في الماضي، ستساعد المؤرِّخين على تأريخ مصدرٍ ما تأريخًا دقيقًا إذا ذَكر ذلك المصدر إحدى وقائع الكسوف.) أما مزْج الحليب أو ذوبان الثلج فهو عمليةٌ غير قابلة للانعكاس؛ فثمَّة معلوماتٌ تُفقَد في العملية؛ ومن ثمَّ يتوافق العديد من الحالات الأولية لفنجان القهوة أو الشراب البارد مع الحالة النهائية نفسها. وبقدرِ ما يمكننا استخدام ديناميكيات الأنظمة غير القابلة للانعكاس لتعلُّم أشياء عن حالتها السابقة، فينبغي أن يحدث ذلك بشكل غير مباشر وعَبْر افتراضات أساسية إضافية.

ثمَّة مفهومان مرتبطان أحدهما بالآخر يساعدان في فَهْم أهميةِ القابلية للانعكاس. يصبح النظام تكراريًّا إذا كرَّر نفسه إلى ما لا نهاية، حتى إننا إذا أدخلنا فيه بعضَ البيانات الأولية، فستتطابق بياناتُ النظام في وقتٍ مستقبلي مع تلك البيانات الأولية. ويقال إنَّ للنظام «منطقة جاذبة» إذا كانت به حالةٌ ما (أو مجموعة من الحالات التي لا تتضمَّن كل الحالات) بحيث إنه مهما كانت الحالة الأولية للنظام، فسينتهي به الأمر إلى الحالة (الحالات) الجاذبة ثم يستقر فيها إلى أجلٍ غيرِ مسمًّى. (في الميكانيكا الإحصائية، كثيرًا ما يُطلَق على الحالات الجاذبة «حالات التوازن» ويُطلَق على العملية التي تتمثل في التطوُّر نحوها اسم «الاتزان»).

بشكلٍ عام، لا تصبح الأنظمةُ تكراريةً إلا في حالة واحدة وهي أن تكون انعكاسية؛ ولا يصبح لها حالات جاذبة إلا في حالة واحدة وهي أن تكون غير انعكاسية. وبناءً على هذا، يمكننا استخدامُ مصطلح «الأنظمة التكرارية» بدلًا من «الانعكاسية»، ومصطلح «الحالات الجاذبة» بدلًا من «غير الانعكاسية». وتكمن الحجةُ في جوهرها في فكرةِ أنه إذا كان النظام غيرَ تكراريٍّ، فستكون هناك حالاتٌ يغادرها النظام ولا يعود إليها أبدًا؛ ومن ثمَّ تصبح مجموعةُ الحالات — باستثناء الحالات السالفة الذِّكر — منطقةً جاذبة، ويدخل النظام هذه المنطقةَ من دون رجعة. (توجد بعض المحاذير هنا؛ وأهمُّها أن النظام الذي ندرُسه ينبغي أن يكون محصورًا في منطقةٍ معينة كأن يكون صندوقًا أو غرفة.)

يمكننا أن نرى الآن السببَ في أنَّ عدم الانعكاس يثير مشكلةً في الميكانيكا الإحصائية. ففيزياء الأنظمة على المستوى المجهري مثل فيزياء الجسيمات الفردية في الغاز المخفَّف تبدو قابلةً للانعكاس، لكن فيزياء الأنظمة على المستويات الأكبرِ مثل فيزياء الغاز على

مستوى الموائع عادةً ما تكون غيرَ قابلةٍ للانعكاس. وهذا (مبدئيًّا) يجعل من المستحيل أن تكون الأنظمةُ غيرُ الانعكاسية نسخةً مبسَّطة من الأنظمة الانعكاسية.

لِنستخدم مفهومَي التكرار والمناطق الجاذبة لتوضيحِ هذه المسألة. إذا كان النظام المجهري تكراريًّا، فإن أي حالة من النظام ستعود إلى نقطةِ البداية في نهاية المطاف. ولكن هذا يعني كذلك أن أيَّ وصف «مبسَّط» للنظام سيعود هو أيضًا في النهاية إلى نقطة البداية. بعبارةٍ أخرى، إذا كان النظام تكراريًّا، فإنَّ أيَّ وصف مبسَّط لذلك النظام لا بد أن يكون تكراريًّا هو الآخر.

يمكننا أيضًا أن نشرح المسألة بالترتيب المعاكس. لِنفترض أن الوصف المبسَّط غير التفصيلي له منطقةٌ جاذبة، ولْنفترض أن نقطةَ البداية لذلك النظام تقع خارجَ المنطقة الجاذبة. فهذا يعني أن النظام سيدخل إلى المنطقةِ الجاذبة ولن يخرج منها أبدًا. ولكن في هذه الحالةِ، لن يكون النظام المجهري تكراريًّا. على الرغم من ذلك، فعند التفكيرِ في المسألة، نجد أنه لا يمكن للفيزياء غيرِ الانعكاسية العِيانية أن تنبثِق من الفيزياء الانعكاسية المجهرية.

الأدقُّ أن نقول إنها لا يمكن أن تنبثِق حتى يُضاف مكوَّن آخرُ إضافي. وما تخبرنا به هذه الحجج أن النُّسخ المبسَّطة لا يمكن أن تكون هي القصة بأكملها، بل لا بد أن هناك افتراضاتٍ أخرى أو شروطًا تُضاف إلى الفيزياء الانعكاسية المجهرية حتى يظهرَ عدمُ القابلية للانعكاس على مستوًى مبسَّط. ولفَهْم ما قد تكون عليه هذه العناصر الإضافية، نحتاج إلى النظر في السِّمة الثانية للفيزياء العيانية والتي لا توجَد في الوصف التفصيلي الدقيق وهي: الاحتمالية.

الاحتمالية في الميكانيكا الإحصائية

ذكرتُ في القِسم السابق أن كل القوانين التي تناولناها «حتميةٌ»؛ فهي تعطي تنبؤاتٍ فريدة عن المستقبل بناءً على الحاضر. على الرغم من ذلك، فليس كلُّ قوانين الفيزياء على هذه الشاكلة. يبدو أن فيزياء الجسيمات دون الذرية تنطوي على عشوائيةٍ أصيلة، وهذا ما سنكتشفه بمزيدٍ من التفاصيل في الفصلَين الخامس والسادس. لكن حتى في خارج نطاق هذا العالمِ الغريب، توجد ظواهرُ في الطبيعة تحيدُ عن هذا الوصفِ الحتمي، وإن كان ذلك على المستوى الذي ندرُسها فيه على الأقل.

تُعَد الحركةُ البراونية من الأمثلة الكلاسيكية على ذلك. إذا عَلقت حبَّة لقاح في سائل وفُحِصت تحت المجهر، فستُرى وهي تهتزُّ — بشكلٍ عشوائي على ما يبدو — بسبب تصادمها المستمر مع جزيئات الماء. (لا تعبِّر الاهتزازات عن مراتِ التصادم الفردية، بل متوسط العديد من التصادمات.) وليس من الممكن صياغةُ معادلات حتمية لهذه الاهتزازات، فحتى مع توفُّر المعلومات التامة عن الموضع المبدئي للحبَّة وسرعتها المتجهة ليس ذلك كافيًا لتحديدِ سلوكها التالي. على الرغم من ذلك، يمكن صياغةُ ما يُطلَق عليه «معادلة تصادفية» لحبَّة اللقاح؛ وهي معادلة لا تَذكر ما ستفعله حبَّة اللقاح بالتحديد، بل تخبِرنا بمدى أرجحية كلِّ اهتزازة محتمَلة. (على سبيل المثال، يمكن أن تنصَّ المعادلة على أن احتمالات قفزِ الحبَّة متساوية بالنسبة إلى جميع الاتجاهات، وأن متوسط طول القفزة يساوي ١٠ ميكرونات، وأن احتمالية حدوث القفزات الأطول أو الأقصر تساوي القيمة كذا أو كذا.) المعادلات التصادفية قابلةٌ للاختبار تمامًا (عن طريق تكرار إجراء عمليات الرصد وجَمْع الإحصاءات) كما أنها تطرح أوصافًا مفيدةً وغنية بالمعلومات عن العديد من الأنظمة.

والآن، من المغري القول إن العشوائيةَ الظاهرة في سلوكِ حبَّة اللقاح ليست عشوائية «حقيقية». أفلا نستطيع إذا جمعْنا كلَّ المعلومات المضبوطة والدقيقة مجهريًّا عن جزيئات الماء، أن نتنبأ بالسلوك التالي لحبَّة اللقاح على نحوٍ «حتمي»؟ ربما. لكننا إن فعلنا ذلك نتخلَّى عن فكرة طرح وصف «مستقل» لديناميكيات حبَّة اللقاح، والوصف المستقل وهو — مثلما تتذكَّر — هدفنا في الميكانيكا الإحصائية. ونحن لم نتخلَّ عن الفكرة بسبب عدم وجود وصفٍ لهذه الحالة، بل لأننا لا نسمح لهذا الوصفِ المستقل بأن ينطويَ على احتمالات. ومن المنظور المعاكس، توضِّح الحركة البراونية أن القصةَ التي نسرُدها عن كيفية انبثاق الفيزياء العِيانية من الفيزياء المجهرية لا بد أن تسمح بمساحةٍ لعدم الانعكاس وللاحتمالية أيضًا.

بالنسبة إلى الجانب الرياضي، فإنَّ فَهْم كيفيةِ تحقيق ذلك ليس صعبًا. بما أن الديناميكيات المجهرية لا تعرف شيئًا عن الاحتمالية، فإن المكان الوحيدَ لإضافتها هو وصفُ الحالة الأولية للنظام. وعادةً سيوجد الكثير من الحالات المجهرية المتوافقة مع أي وصفٍ مبسَّط للنظام (تذكَّر مثال الغاز حيث احتاج الوصف المجهري $١٠^{٢٧}$ عددًا، بينما احتاج الوصف المبسَّط إلى $١٠^{٨}$ — وفي تلك الحالة، فإن الوصف المبسَّط يترك تلك الأعدادَ غير محدَّدةٍ على الإطلاق، وهو ما يتطابق مع عددٍ هائل من الحالات المجهرية التي تؤدي

إلى الفيزياء العيانية نفسها — حيث تتطابق كلُّ حالة عِيانية مع $١٠^{٢٧}/١٠^{٨} = ١٠^{١٩}$ من الحالات المجهرية). وإذا قلنا إن النظامَ المجهري ليس في حالةِ توافق فحسب، بل ينطوي على «احتمالية» معيَّنة لأن يكون في كل حالةٍ من حالات التوافق، فستكون لدينا طريقةٌ تسمح بدخول الاحتمالات إلى الفيزياء العيانية.

وليس هذا تكهنًا فحسب. فلعلماء الفيزياء طريقةٌ خاصة في اختيار الاحتمالات — تسمَّى «مقياس الاحتمالية الموحَّد» — وهي تنصُّ بصفةٍ عامةٍ على أن كل حالةٍ مجهريةٍ متوافقة مع الوصف العياني للنظام لها درجةُ الاحتمالية نفسها. (الحق أنها تنصُّ على شيءٍ أدقَّ من ذلك، حيث إنه يوجد عددٌ لا نهائي من هذه الحالات بالمعنى الحرفي للكلمة.) وإذا بدأنا بمقياس الاحتمالية الموحد، فلن يكون من الصعب حسابُ المعادلات الخاصة بالحركة البراونية، بما فيها الاحتمالات. يمكننا تلخيصُ المسألة تلخيصًا تخطيطيًّا بالمعادلة التالية:

الفيزياء المجهرية الحتمية + مقياس الاحتمالية الموحَّد
⟵ الفيزياء العيانية التصادفية

إنَّ تقديم الاحتمالية يوفِّر طريقةً واضحة لتفادي مشكلة عدم القابلية للانعكاس التي تناولناها في القِسم السابق. فقد رأينا استحالةَ أن تتطوَّر «كل» حالةٍ مجهرية متوافقة مع وصفٍ مبسَّطٍ محدَّد، وفقًا للفيزياء العيانية غيرِ الانعكاسية الخاصة بذلك النظام. ولكن هذا لا ينفي احتماليةَ أن «الغالبية العظمى» من هذه الحالات المجهرية (حسب قياسها وفقًا لمقياس الاحتمالية الموحَّد) قد تتطوَّر وفقًا لتلك الفيزياء العيانية؛ أو ربما تتطوَّر «لمدة طويلة للغاية» على الأقل. (والتكرار يعني أنه لا يمكن لهذه الحالات أن تظلَّ تتطوَّر إلى الأبد.) وتلك بالطبع هي الإجابة التقليدية لعلماء الفيزياء على مسألة عدم القابلية للانعكاس:

> نعم، ليس مؤكدًا أن النظام سيخضع لقوانين عدم الانعكاس — ولا يمكن أن يفعل ذلك إلى الأبد — ولكن من شِبه المؤكد أنه سيخضع لتلك القوانين مدةً طويلة من الزمن.

ليس هذا محضَ احتمال مبدئي. فالطريقة الفعلية التي يستخدمها علماء الفيزياء لصياغة معادلاتٍ عامة من الفيزياء المجهرية؛ هي بالتحديد فرض مقياس الاحتمالية

الموحَّد، ثم استنتاج الديناميكيات المبسَّطة؛ وهذه الطريقة «ناجحة» بالمعنى العملي للكلمة بدليل أنَّ المعادلات المشتَّقة تتطابق مع التجربة. ثمَّة معادلة تخطيطية أخرى يمكننا كتابتها على النحو التالي

الفيزياء المجهرية الانعكاسية + مقياس الاحتمالية الموحَّد
⟵ الفيزياء العيانية غير الانعكاسية، بشكلٍ شِبه مؤكَّد

إنَّ هذه التصورات — أنَّ الميكانيكا الإحصائية تتطلَّب إضافةَ عنصر الاحتمالية إلى الفيزياء المجهرية، وأنَّ ذلك يتيح إعادةَ إنتاج عدم الانعكاس عمليًّا — هي الأساس المفاهيمي للميكانيكا الإحصائية الحديثة. وقد حقَّقت هذه نجاحاتٍ عميقةً؛ إذ تَدعم مجموعةً كبيرة من العلوم التي تؤتي ثمارَها على المستوى التجريبي. على الرغم من ذلك، فهي لا تكفي لحل الإشكالية المفاهيمية للميكانيكا الإحصائية، ويعود ذلك إلى سببَين: أولهما هو غموض مفهوم الاحتمالية، وثانيهما أنه من غير الممكن منطقيًّا أن يفسِّر هذا المفهوم بمفرده ظهورَ عدم الانعكاس على أي حال.

ما هي الاحتمالات الإحصائية؟

لِنفهم مقياسَ الاحتمالية الموحَّد — بوجهٍ عام — على أنه بيانٌ ينصُّ على تساوي الاحتمالية لتوافق كل حالةٍ مجهريةٍ مع وصفٍ عيانيٍّ محدَّد. فما الذي يعنيه ذلك في حقيقة الأمر؟

فيما يلي أحدُ المعاني الممكنة:

> أنا لا أعرف ماهيةَ الحالة الفعلية؛ لذا أعتقد أنَّ الاحتمالية متساويةٌ لكلٍّ منها. وبناءً على هذا، فإنَّ مقياس الاحتمالية الموحَّد يعبِّر عن جهلي بالحالة الحقيقية.

يتلاءم هذا النهج بصورةٍ طبيعيةٍ مع ما أسمِّيه «التصور الاستدلالي» للميكانيكا الإحصائية، متمثِّلًا في الفكرة القائلة بأن الميكانيكا الإحصائية هي مجموعة أدواتٍ تُتيح لنا التوصُّل إلى استدلالاتٍ عن الأنظمة المعقَّدة، في ظل القيود التي يفرضها علينا جهلنا. ويتَّسم هذا النهج بخاصية الوضوح؛ فمن المقبول على نطاقٍ واسع — في الفيزياء والفلسفة على حدٍّ سواء — أن تُستخدم الاحتمالات لتحديد مدى تأكُّدنا من شيءٍ ما أو عدم تأكدنا منه.

على الرغم من ذلك، فإنَّ هذا النهجَ يتشارك العيبَ الرئيسي في التصوُّر الاستدلالي ويزيده وضوحًا: أنه يبدو من غير الملائم أن نفسِّر الظواهر الموضوعية المنتظِمة العيانية التي نرصدها في الطبيعة. ففي حالة الحركة البراونية على سبيل المثال، تبدو حقيقةً موضوعيةً أن احتماليةَ قَفْز الجُسَيم في اتجاهٍ ما تتساوى مع احتمالية قفزه في اتجاهٍ آخر، ويمكننا اختبارُ هذه الحقيقة من خلال جَمْع الإحصائيات للعديد من حبوب اللقاح. كان يمكننا أن نعرف ذلك، بل إننا عرفنا ذلك بالفعل، قبل أن نستوثقَ من وجود جزيئات الماء الفردية، فضلًا عن طبيعتها الفيزيائية المفصَّلة؛ ولهذا من الصعبِ أن نُدرك كيف يمكن أن يكون لتلك الإحصائيات المرصودة علاقةٌ كبيرةٌ بجهلنا بالمواضعِ الدقيقة لجزيئات الماء وسرعاتها المتجهة.

(ثمَّة مشكلة أخرى فنية بدرجةٍ أكبر في هذا النهج. فمثلما ذكرتُ بإيجازٍ سابقًا، فإن مقياس الاحتمالية الموحَّد لا يُوصف بأنه «تَساوي درجة الاحتمالية لكل حالة» إلا على سبيل المجاز. أما في الواقع، فيوجد عددٌ لا نهائي من الحالات المتوافقة مع أي وصفٍ عياني، وتلك مسألةٌ أكثر إثارة للجدل وتعقيدًا من أن نذكر الطريقة «الصحيحة» للتعبير عن جهلنا بالحالة الحقيقية.)

لكن إذا كان هذا «التأويل بالجهل» للاحتمالات الميكانيكية الإحصائية لا يفسِّر السلوكَ المرصودَ في الحقيقة للأنظمةِ التي ندرُسها، فلا بد من الاعتراف بأن البدائلَ ليست واضحة. ويتمثَّل أحد الاحتمالات الطبيعية فيما يلي:

> ما أعنيه حقًّا بالاحتمالية في هذا المقام هو التواتر فحسب. يوجد العديد من الأنظمة التي تشبه هذا النظام؛ ومقياس الاحتمالية الموحَّد هو مقياس للتواتر النسبي للحالات الدقيقة عَبْر كلِّ تلك الأنظمة.

غالبًا ما يكون هذا «التأويل بالتواتر» للاحتمالات هو ما نجده في الكتب الدراسية، لكنه أيضًا تأويل غير مرضٍ تمامًا. فمن ناحيةٍ ما، لا يبدو أن هذا التواتر ملائمٌ لتفسيرِ السبب في اتخاذ هذا النظام بالتحديد لذلك السلوك الذي يسلكه. ومن ناحية أخرى، يوجد العديد من الأشياء التي قد يعنيها «نظام مثل هذا»، وفي أحسن الأحوال، لن يكون الأمر مريحًا إذا انتهى تفسيرنا لظاهرةٍ مركزيةٍ في الميكانيكا الإحصائية، مثل عدم القابلية للانعكاس، بالاعتماد على أسئلةٍ تتعلق بالتصنيف على هذا النحو.

يوجد الكثير مما يمكن أن يُقال تأييدًا لكلٍّ من التفسير القائم على الجهل والقائم على التواتر، غير أنه لا توجد نسخةٌ لأيٍّ منهما يقبَلها الجميع، وهما لا يستنفدان كلَّ الاحتمالات. (ومن وجهة نظري الضئيلة إلى حدٍّ ما، فإننا بحاجةٍ إلى طريقةٍ لإضافة الاحتمالات صراحةً إلى فيزياء الأنظمة الفردية، والأصل النهائي لتلك الاحتمالات ميكانيكي كمومي). الحق أنَّ تفسيرَ الاحتمالات في الميكانيكا الإحصائية من ألغازها الفلسفية المركزية، ويليه في ذلك مشكلةُ عدم القابلية للانعكاس، التي أعود إليها الآن.

الانعكاس يولِّد الانعكاس

لدى مبرمجي الكمبيوتر مقولةٌ شهيرة: «المُدخَلات الخاطئة تولِّد مُخْرجات خاطئة». ترمي هذه المقولة إلى أنه مهما بلغت مهارةُ البرنامج، فإنه يعمل في النهاية وفقًا لمُدخَلاته؛ وإذا كانت تلك المُدخَلات معيبة، فسينتقل العيب إلى المُخرَجات. يحيا فلاسفة الميكانيكا الإحصائية بمقولةٍ مماثلة: «القابلية للانعكاس تولِّد القابلية للانعكاس». معنى هذه المقولة أنه إذا كانت الفيزياء المنبثِقة العيانية غيرَ انعكاسية، وأنت تدَّعي أنك اشتققت تلك العمليةَ غيرَ الانعكاسية من فيزياء انعكاسيةٍ مجهرية عن طريق بعض الافتراضات، فإما أنك تغُشُّ أو أن افتراضًا أو أكثر من هذه الافتراضات مبنيٌّ على الافتراض الضمني بعدم القابلية للانعكاس.

هذه النقطة مهمةٌ وتستحق التوضيح والشرح. تضع العمليةُ غير الانعكاسية فرقًا جوهريًّا بين الماضي والمستقبَل؛ فالنظر إلى المعادلات الديناميكية كفيلٌ وحدَه بأن يميز بين الماضي والمستقبل. غير أنَّ هذا لا يتحقق في العملية الانعكاسية؛ إذ يمكننا اعتبار كِلا الاتجاهَين في الزمن على أنهما «ماضٍ» أو «مستقبَل»، ويكون لكلَيهما الصلاحية نفسُها فيما يتعلق بالرياضيات على الأقل. إذا اشتققنا إذن إحدى العمليتَين من الأخرى، فلا بد من أنَّ شيئًا قد أضيف في أثناء الاشتقاق للإخلال بالتناظر بين الماضي والمستقبَل.

وهنا، نميل إلى طرح السؤال: ما الذي «يمكن» أن يخلَّ بالتناظر على هذا النحو؟ (عند هذا الحد يمكن أن يصبح التخمين غيرَ منضبط.) لكن ثمَّة طريقة أفضل للإجابة عن السؤال: بما أن علماء الفيزياء لديهم طريقةٌ لاشتقاق المعادلات المبسطة غير الانعكاسية، بناءً على إضافة مقياس الاحتمالية الموحَّد إلى الفيزياء المجهرية، ففي أي مرحلةٍ تخلُّ تلك الطريقة بالتناظر؟

الحق أنَّ لهذا السؤال إجابةً بسيطة، وإن كان ذلك من حيث المبدأ على الأقل. ربما تتذكَّر أنَّ مقياس الاحتمالية الموحَّد هو الافتراض القائل بتساوي درجةِ الاحتمالية لكل حالةٍ مجهريةٍ متوافقةٍ مع الوصف المبسَّط لنظامٍ ما. ثمَّة جزءٌ صغيرٌ من تلك الحالات المجهرية لن يتسم بالديناميكا المبسَّطة المتوقَّعة، ولكن الغالبية العظمى منها ستفعل؛ ومن ثمَّ يمكننا أن نكون شبه واثقين من ظهور تلك الديناميكا في الواقع. ويمكننا حينئذٍ أن نطرح السؤال: إذا كان مقياس الاحتمالية الموحَّد مفروضًا على الحالةِ الأولية للنظام، فهل سيظل ينطبق على الحالات المتأخِّرة؟ والإجابة هي أنه لن ينطبق؛ ذلك أننا إذا عكفنا على دراسة النظام مدةً محدَّدة من الوقت على سبيل المثال، بحيث يكون من المنطقي أن نتحدَّث عن حالته النهائية مثل حالته الأولية على حدٍّ سواء، فسيكون توزيع الاحتمالية للحالة النهائية مختلفًا تمامَ الاختلاف عن مقياس الاحتمالية الموحَّد.

يمكننا أيضًا أن نرى ذلك الأمرَ بطريقة أخرى. افترض أننا تجاهلنا الادعاءَ بأن الحالة «الأولية» للنظام هي حالته الأولى في الحقيقة، وطوَّرنا النظام بالعكس (تذكَّر أنه يمكننا ذلك لأن الديناميكيات المجهرية انعكاسية). وفقًا للتناظر، حريٌّ بنا أن نتوقَّع أن الوصف المبسَّط لذلك التطور العكسي سيعطينا نسخةً منعكسة زمنيًّا للديناميكا العيانية غير الانعكاسية؛ فهي ديناميكا قابلةٌ للانعكاس زمنيًّا تتيح لنا التنبؤَ بالوصف الشامل المبسَّط في الماضي، بناءً على القيمة في الزمن الحاضر. لنزِد الأمرَ وضوحًا: إذا طبَّقنا مقياسَ الاحتمالية الموحَّد على حالةٍ من القهوة، حيث يُمزج بها الحليب جزئيًّا ثم تطوَّر الأمر بطريقةٍ عكسية، فسنتنبأ (نستنتج بشكلٍ رجعي في الواقع) أن القهوة والحليب كانا أكثرَ امتزاجًا في الماضي. بناءً على هذا النهج، فإن تاريخ فنجان القهوة يبدأ بمَزْج القهوة بالحليب مزجًا تامًّا، والمرور بفترةٍ وجيزةٍ من عدم المزج، ثم بَدْء المزج مرةً أخرى. واللحظة التي تشهد الدرجة الأدنى من المزج هي اللحظة التي فرضنا فيها مقياس الاحتمالية الموحَّد.

نفهم من هذا أنه إذا كانت الغالبية العظمى من الحالات ستتطوَّر إلى المستقبَل وفقًا للديناميكا غير الانعكاسية، فإن الغالبية العظمى من الحالات — بالقدْر نفسه — ستتطور إلى الماضي وفقًا للديناميكا غير الانعكاسية المعكوسة زمنيًّا. وكما قال الفيلسوف ديفيد ألبرت، فإن الغالبية العظمى من الحالات «في سبيلها إلى التغيُّر للحالة المعاكسة». وهذا بدوره يعني أنه إذا تحدَّدت الحالة الأولية للنظام وفقًا لمقياس الاحتمالية الموحَّد، فإن احتمالات الحالة النهائية تتركَّز في عددٍ ضئيل للغاية من الحالات، التي كانت تتبع قوانين الديناميكا العادية غير الانعكاسية (غير المعكوسة زمنيًّا) في الماضي.

المحصِّلة من هذا كلِّه أننا بتطبيق مقياس الاحتمالية الموحَّد، فإننا نختار لحظةً زمنية مفضَّلة. ولا تتنبأ الميكانيكا الإحصائية بعدم القابلية للانعكاس، إلا إذا كنا نصرُّ على أن تلك اللحظة المفضَّلة هي اللحظة الأولى في النظام. ويُفيد ذلك كثيرًا في التنبؤ بسلوك النظام في مراحلَ لاحقة، لكنه يعطي تنبؤاتٍ خاطئةً للغاية عن كيفية تطوُّر النظام قبل تلك اللحظة.

ما الذي يسوِّغ ذلك إذن؟ ثمة إجابتان عن هذا السؤال، وهما مختلفتان تمامَ الاختلاف، يتوافق كلٌّ منهما مع التصورَين المختلفَين للميكانيكا الإحصائية اللذَين ناقشناهما سابقًا.

أصول عدم الانعكاس

تذكَّر أنه بناءً على التصوُّر الاستدلالي للميكانيكا الإحصائية، تتمثَّل فكرةُ المشروع في توفير الأدوات لدراسة الأنظمة حينما لا يكون لدينا سوى معلومات جزئية عنها؛ أي حين لا يكون لدينا سوى معلومات مبسَّطة عنها مثلًا. ومن ذلك المنطلَق، فقد يكون مقياس الاحتمالية الموحَّد هو أفضل أداة يمكننا استخدامُها، فيما يتعلَّق بطَرْح تنبؤاتٍ عن «مستقبل» نظامٍ ما. أما حين يتعلَّق الأمر بطرح تنبؤاتٍ عن «ماضي» نظامٍ ما، فخياراتنا أفضل من ذلك بكثير؛ إذ إنَّ لدينا بالفعل سجلاتٍ للماضي ومعلوماتٍ عنه. إنَّ محاولة التوصُّل إلى استنتاجاتٍ عن الماضي باستخدام مقياس الاحتمالية الموحَّد فحسب، هي محاولةٌ تقتصر على استخدام جزءٍ ضئيلٍ للغاية من المعلومات التي لدينا؛ لا عجب إذن في أنها تُعطينا نتائجَ سيئة.

وبالمثل أيضًا، لنفترض أننا نحاول بالفعل إعدادَ نظام ثم نراقب كيفيةَ تطوُّره؛ فنعد النظام بحيث يتضمَّن وصفًا مبسطًا بقَدْر معيَّن، لكننا نفتقر إلى الدقَّة التجريبية لتثبيت حالته المجهرية الدقيقة. ومن ثمَّ فنحن جاهلون بتلك الحالة المجهرية، ومقياس الاحتمالية الموحَّد طريقةٌ طبيعية للتعبير عن ذلك الجهل. وإذا أردنا أن نتنبأ بحالةِ النظام في أوقاتٍ لاحقة، فإن طرق الميكانيكا الإحصائية هي أفضل خياراتنا. على الرغم من ذلك، فسيكون من الحماقة بالطبع إذا حاولنا التنبؤ بحالةِ النظام في أوقات سابقة باستخدام تلك الطرق. ذلك أنها تفترض أن النظام يتطوَّر وفقًا لقوانين الديناميكا الخاصة به، ومن دون تأثيرٍ خارجي، ونحن نعلم أن هذا ليس صحيحًا في ماضي النظام؛ لأن عملية الإعداد التي أجريناها هي ذلك «التأثير الخارجي».

الفكرة المركزية هنا هي أن الفرق بين الماضي والمستقبَل في الميكانيكا الإحصائية، ليست سوى نتيجةٍ للفرق الذي تفرضه طبيعتنا، بصفتنا كِيانات عاقلة وقائمين بالتجارب. فذكرياتنا وقدراتنا على التدخُّل في العالم تحدِّد اتجاهًا في الزمن، وعدم القابلية للانعكاس في الميكانيكا الإحصائية يتبع ذلك الاتجاه.

الحق أنَّ هذا النهج منمَّق وله شعبيته الكبيرة بين بعض علماء الفيزياء، لا سيما المهتمين بنظرية المعلومات. غير أنَّ الثمن غالٍ مقابل هذا التنمُّق؛ فباتخاذ إدراكنا البشري باعتباره «المُدخل» لاتجاه الزمن، فإنه يستبعد أيَّ محاولة لشرح مصدر ذلك الاتجاه نفسه. وبسبب التفسير الدائري تحديدًا، «يبدو» أنه لا يمكن اللجوءُ إلى عدم التناظر وعدم الانعكاس في الفيزياء العيانية، لشرح السبب في أننا نمتلك في الواقع — باعتبارنا أنظمة فيزيائية — القدرةَ على تذكُّر الماضي والتأثير في المستقبل، وليس العكس. إضافة إلى ذلك، يبدو أن النهج يفتقر إلى الموارد التي تفسِّر السببَ في الحقيقة الواضحة، المتمثِّلة في أنَّ الكثير من العمليات الفيزيائية المتنوِّعة المنتشرة في الكون تتسم بخاصيةِ عدم القابلية للانعكاس، حتى حينما لا يكون لنا علاقة بها. فظواهر مثل ذوبان الجليد وثوران البراكين وميلاد النجوم وموتها، كلُّها تقع خارج نطاق سيطرتنا، ومن الجلي أنها تتبع قوانين عدم القابلية للانعكاس.

ما البديل إذن؟ تذكَّر أنَّ مقياس الاحتمالية الموحَّد هو حالةٌ أولية معيَّنة في النظام؛ فهو ينجح في توليد الديناميكا غيرِ الانعكاسية في المستقبل، لكن ليس في الماضي. فكلَّما أبكرنا في فرضِه على أي نظام، طالَت المدة التي تعمل فيها طرائقُ الميكانيكا الإحصائية. إنَّ الحالة المقيِّدة بسيطةٌ بقَدْر ما هي خطيرة: فرض الحالة على الكون ككل، في بداية الزمن.

إنَّ الاسم العام لحالةٍ من هذا النوع هو «فرضية الماضي»؛ ويُقصَد بها تحديدُ التفاصيل المجهرية الدقيقة للكون بعد الانفجار العظيم. لا تزال تفاصيلُ ما ينبغي أن تكون عليه هذه الفرضية محلَّ خلافٍ إلى حدٍّ ما (فحينما ننظر إلى التفاصيل، نجد أن هناك احتمالات أكثر من مجرد فرض مقياس الاحتمالية الموحَّد)، لكن الفكرة الأساسية مشتركة بين جميع التنويعات على اختلافها؛ فعدم الانعكاس بحاجةٍ إلى حالةٍ أولية بالإضافة إلى الديناميكا المجهرية الانعكاسية، وهي لا تنطبق إلا بعد فرض ذلك الشرط؛ إذا كان عدم الانعكاس إحدى سِمات العالم التي تتسم بالموضوعية ولا تتوقف علينا، فإننا بحاجةٍ إلى التعامل مع فَرْض تلك الحالة باعتبارها حقيقةً عن العالم، لا عن طريقة

تفاعلنا معه فحسب. ولفرض الحالة باستمرار، فإننا نرجع إلى الوراء أكثرَ فأكثر حتى ينتهيَ بنا الأمر إلى فرضها عند خلق الكون.

لا شك أنَّ فكرة أنَّ حالات عدم الانعكاس المرصودة التي نراها هنا والآن لها أصلٌ في علم الكونيات؛ هي فكرةٌ مفاجِئة، بل غريبة. لكن إذا تبنينا تصورًا ديناميكيًّا للميكانيكا الإحصائية؛ وإذا كنا نريد حقًّا أن نرى النظريةَ على أنها تفسيرٌ للفيزياء العيانية المنبثقة والصحيحة موضوعيًّا، فإنه يصعُب تحاشي منطقِ هذه الفكرة.

ثمَّة افتراض يبدو بريئًا نطرحه في هذا الفصل: من المنطقي أن نفترضَ أن النظام المجهري له حالة واحدة بشكلٍ أو بآخر في الحقيقة، وأن الأجزاء المكوِّنة له لها سرعات متجهة ومواضعُ في الحقيقة، حتى وإن كنا لا نعلمها. غير أنَّ هذا الافتراض محلُّ جدالٍ في «ميكانيكا الكم»، التي هي أغربُ نظريةٍ في الفيزياء الحديثة بلا شك. وفي الفصلَين الأخيرَين من الكتاب، سأناقش الألغازَ الفلسفية المتعلِّقة بهذا الموضوع الفريد.

الفصل الخامس

ألغاز الكم

يمكن أن تكون «النظرية» في الفيزياء أشياءَ كثيرة، بدايةً من المحدَّد للغاية إلى العام للغاية. فمن ناحيةٍ ما، توجد النظريات التي تصِف أنظمةً خاصة ومحدَّدة، حيث إنها تحدِّد — على مستوًى ما من الوصف على الأقل — خصائصَ النظام وسلوكه تحديدًا كاملًا، وتسمَّى هذه النظريات بـ «النماذج» في بعض الأحيان. تُعَد ميكانيكا الكواكب في المجموعة الشمسية من أمثلة هذه النظريات؛ فهي تقول بوجود ثمانية كواكب إضافةً إلى الشمس، وأن كتل الكواكب كذا وكذا، وأنها تتحرَّك على هذا النحو أو ذاك. وعند مستوًى أعمَّ قليلًا، يوجد «الإطار» المجرَّد لميكانيكا نيوتن الكلاسيكية الذي لا يضم المجموعة الشمسية فحسب، بل أي نظام مكوَّن من أجسامٍ تتحرَّك بفعل الجاذبية في نظامٍ لا تهم فيه النسبية.

والآن، سنتناول المسألةَ بنظرةٍ أعمَّ بعضَ الشيء. إنَّ النسبية الخاصة لا تصف أيَّ نظام محدَّد أو مجموعة من التفاعلات، بل هي إطار يضم أيَّ نظرية نشتق بنيتها القصورية من مبدأ النسبية والافتراض الخاص بالضوء (أو يمكننا القول — إن أردت — إنها إطار يضم أيَّ نظرية تكون بيئةُ زمكانها الطبيعية هي الزمكانَ في تصوُّر منكوفسكي)، سواء أكانت تلك النظرية تتعلَّق بجسيمات في مسرِّع أم تتعلَّق بمادة على نطاق كبير بعيد. إنها لا تتعارض مع النظريات المحدَّدة مثل ميكانيكا نيوتن الفلكية، بل تتعارض مع الأطر البديلة لكتابة هذه النظريات، مثل الإطار الذي تصفه نظريةُ الزمكان في تصوُّر جاليليو. وبالمثل، فإن الفكرةَ الناتجة عن مبدأ التكافؤ — بأن الجاذبية هي تمركُز البنية القصورية — هي إطارٌ للنظريات المتعلِّقة بالجاذبية (أو عبارة عن أطرٍ متعدِّدة بناءً على ما إذا كانت البنية القصورية المطلوب تحديدُ موضعها هي بنية نيوتن

وجاليليو أم بنية أينشتاين ومنكوفسكي). وبذلك، توصف النظرياتُ المحددة كالنسبية العامة وجاذبية نيوتن ضمن هذه الأطر.

(بعض الأطر العامة الأخرى، تصنِّف هذه الأطرَ الخاصة بالزمكان والقصور الذاتي تصنيفًا متقاطعًا. فمن هذه التصنيفات، «ميكانيكا الجسيمات» وهي الإطار الذي تندرج تحته جميع النظريات التي تصف أنظمةَ الجسيمات النقطية التي يتفاعل بعضها مع بعض، سواء أكانت تلك «الجسيمات النقطية» جسيماتٍ صغيرةً للغاية بالفعل أم تمثيلات للنجوم والكواكب، ويمكن المقابلة بينه وبين «نظرية المجال»، وهي الإطار العام الذي تندرج تحته نظرية الكهرباء والمغناطيسية، وهما أشهر نظرياته.)

ومع ذلك، فحتى الأطر التي تكون على هذه الدرجة من العمومية ليست هي النهاية. فعندما نفهم «الميكانيكا الكلاسيكية» بمعناها الأوسع، نجد أنها تتضمَّن في جوهرها جميع النظريات التي تناولناها حتى الآن، وهي لا تطرح أيَّ افتراضات بشأن البنية القصورية أو طبيعة المادة. إنَّ كلَّ ما يستلزمه الإطار جوهريًّا من النظريات هو: (١) أن يكون لكل نظام تصِفه حالةٌ مادية — وصف مكوِّنات النظام وخصائصه — على أن تذكر النظرية تطوُّر هذه الحالة بمرور الوقت؛ (٢) إذا كان من الممكن تقسيمُ النظام إلى أجزاء، فينبغي أن يكون لكل جزء حالته الخاصة بحيث يمكن استنتاجُ حالة النظام بأكمله من خلال حالات الأجزاء.

ربما تتساءل، هل يُعَد ذلك إطارًا بالفعل أم أنه تحصيل حاصل فحسب؟ أيُعقَل أصلًا أن توجد نظرية فيزيائية لا تندرج ضمن إطار الميكانيكا الكلاسيكية؟ من اللافت للنظر أنَّ هذا هو الواقع بالفعل؛ فجزءٌ كبير من الفيزياء، بما في ذلك معظم النظريات الناجحة العظيمة في القرن العشرين، تندرج بدلًا من ذلك ضمن إطار «ميكانيكا الكم». طُوِّر هذا الإطار في الأصل لتفسير فيزياء المواد دون الذرية، لكنه أصبح يشكِّل الأساسَ لعلم الفيزياء على كل المستويات، بدايةً من بوزون هيجز وحتى التقلبات الكمية التي وزعت المجرات عَبْر سماء الليل، ونذكر فيما بين هذا وذاك على سبيل المثال لا الحصر، نظرية التوصيل الفائق، وكيفية عمل الترانزستور داخل أجهزة الكمبيوتر المحمول والهواتف المحمولة، وأسرار الأسلحة النووية. إنَّ أقلَّ ما يمكن قوله عن هذا الإطار أنه ناجحٌ للغاية.

وعلى الرغم من ذلك، فنحن لا نفهمه.

الأحرى أنه لا يوجد «اتفاق» بشأنِ كيفية فَهْمه، سوى الاتفاق على أنه لا يمكن فَهْمه بأي حالٍ من الأحوال، بالطريقة التي تُفهم بها الميكانيكا الكلاسيكية. يرى بعض علماء

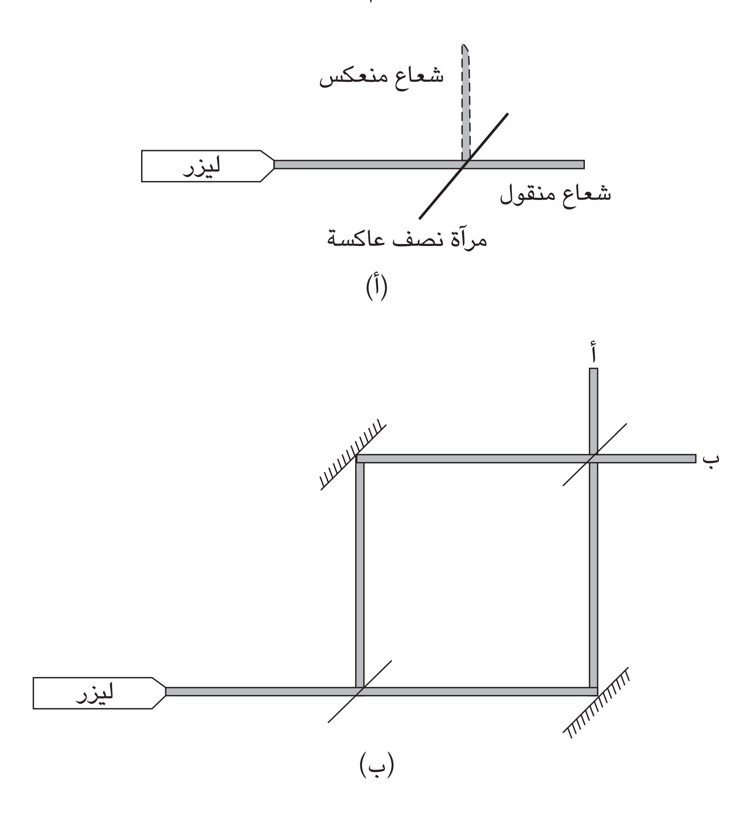
الفيزياء والفلاسفة في ميكانيكا الكم سببًا يدعو إلى إعادة التفكير في مفهوم العلوم ككل. يعتقد آخرون أن مفارقات هذا المجال حادةٌ لدرجةٍ تستدعي تبديل النظرية نفسها. وثمة فريقٌ آخر يرى أنها تبرهن على أن الكون الذي نعيش فيه هو مجرد جزءٍ واحدٍ من واقعٍ أفسح.

في هذا الفصل، ومن خلال وصف ثلاث تجارب بسيطة، سأحاول أن أوضح الماهية الحقيقية لهذه القضايا العميقة التي تنطوي عليها ميكانيكا الكم، وأوضح السبب في اختلاف إطار ميكانيكا الكم عن إطار الميكانيكا الكلاسيكية. وفي الفصل السادس، سأتناول الدروس التي نستطيع تعلُّمها من هذا الإطار للاستفادة منها في الفيزياء والفلسفة، وكذلك لفَهْم مكاننا في الكون.

التداخل والقياس

سلِّط شعاع ليزر على مستشعر ضوء، وقِس قوةَ الإشارة مع خفض قوة الشعاع. فستجد أنَّ النتيجة بسيطةٌ لبعض الوقت: انخفاض بسيط في كمية ضوء الليزر المكتشفة. على الرغم من ذلك، يوجد حدٌّ للطاقة حيث لا يُكتشف الضوء على الإطلاق إذا لم يُكتشف عنده. إنَّ خفض طاقة الليزر إلى درجة أدنى من هذا الحد لا يعني استشعار الضوء بدرجة أضعف: بل يعني أن وتيرةَ استشعار الضوء تقل أكثر فأكثر، ولكن في كل مرة يتم فيها استشعار الضوء، تستشعر نفس الكمية الثابتة من الطاقة. بمعنى أنه يبدو أن الضوء يأتي في كميات من الطاقة الثابتة؛ كموم الضوء (ومن هنا أتى اسم ميكانيكا الكم). وتعتمد الطاقة الخاصة بكل كم من كموم الضوء على شيء واحد هو لون الليزر؛ ففي حالة كل لون من الألوان، تتطابق كميةُ الطاقة مع كمية الكموم المنبعثة سواء بالزيادة أو بالنقصان. بعبارة أخرى، فإن شعاع الضوء عبارة عن تدفُّق «جسيمات» الضوء؛ أو «الفوتونات» كما يسمِّيها علماء الفيزياء.

يبدو كلُّ شيء على ما يرام حتى الآن؛ فما من شيء جنوني جوهريًّا بشأن تكوُّن الضوء من جسيمات (وهذا ما كان نيوتن يعتقده في الحقيقة). الآن، سنزيد تعقيدَ الأمور قليلًا. تُوضع مرآة «نصف عاكسة» — مرآة تعكس نصف الضوء الساقط عليها — بزاوية من شعاع الليزر، بحيث تقسم الشعاعَ إلى شعاعَين لكلٍّ منهما نصف القوة (الشكل ٥-١(أ)).



شكل ٥-١: تجارب التداخل في حالة الضوء: (أ) تقسيم شعاع الضوء بمرآة نصف عاكسة؛ (ب) التداخل — تقسيم شعاع الضوء وإعادة تجميعه.

هل تقسم المرآة نصف العاكسة كل فوتون إلى فوتونَين بنصف القوة؟ أم إنَّ نصف الفوتونات يذهب في طريقٍ ويذهب نصفها في الطريق الآخر؟ للوهلة الأولى، يبدو أنَّ أيًّا من الاحتمالَين ممكنٌ، لكننا حين ننظر ونضع المستشعرات في كل شعاع، نجد أنه في كل مرة يُكتشف فيها فوتون ما، يكون له مقدارُ الطاقة نفسه الذي اكتشفناه سابقًا، ولا يعتمد ذلك إلا على لون الشعاع. «يبدو» أنه إذا ارتطم الفوتون بالمرآة نصف العاكسة، فإنه إما ينحرف وإما يمرُّ، ويبلغ احتمال حدوث كلٍّ من الحالتَين ٥٠ بالمائة. مرة أخرى، لا بأس بهذا حتى الآن.

سنضيف الآن تعقيدًا آخر. سنستخدم مرايا عادية لحني الشعاعَين بحيث يتقاطعان، وفي نقطة التقاطع نُدخل مرآة نصف عاكسة (الشكل ٥-١(ب)). ما يؤدي إليه هذا هو أنه يقسم الأشعةَ ثم يعيد تجميعها ثم يقسمها مرةً أخرى. والآن يبدو وكأن الفوتون أمامه أربعة طرق يمكنه أن يسلكها. إذا ارتدَّ الفوتون عن المرآتَين نصف العاكستَين، أو لم يرتدَّ منهما، فسينتهي به الأمر إلى مكان واحد (المكان أ في الشكل ٥-١(ب)). وإذا ارتد عن المرآة نصف العاكسة الأولى دون الثانية، أو من الثانية دون الأولى، فسينتهي به الأمر إلى مكانٍ آخر (المكان ب في الشكل ٥-١(ب)).

نعرف أن احتماليةَ ارتداد كل فوتون في كل مرة يرتطم فيها بالمرآة تبلغ ٥٠ بالمائة. وبناءً على هذا، يبدو أنَّ نسبة حدوث كلٍّ من هذه الاحتمالات الأربعة تساوي ٢٥ بالمائة. حتى من دون إجراء التجربة، «يبدو» أننا نعرف ما سنجده بالتأكيد: في نصف المرات (٢٥٪ + ٢٥٪) يصل الفوتون إلى النقطة «أ»، في حين يصل في النصف الآخر إلى النقطة «ب»؛ ومن ثمَّ يعطي المستشعران إشاراتٍ متساويةً في القوة.

غير أننا لا نجد هذه النتيجة. فبالاعتماد الدقيق على طول كل شعاع بالضبط، يمكن للقائم بالتجربة الترتيبُ بحيث يُستشعر «كل» الضوء عند النقطة «أ»، أو عند النقطة «ب»، أو في أي نقطة بينهما.

يطلِق علماء الفيزياء على هذا التأثير اسم «التداخل»، وهم يقصدون معناه الحرفي؛ إذ إن أحد الشعاعَين يتداخل بطريقةٍ ما مع الشعاع الآخر؛ لذا فإن ما يحدث للضوء يعتمد على الشعاعَين كلَيهما. وإذا حجبنا أحدَ الشعاعَين كليًّا بالفعل، فسيختفي التداخل؛ وسيظهر نصف أشعة الضوء (المتبقية) عند النقطة «أ» ويظهر النصف الآخر عند النقطة «ب». يبدو إذن أنَّ ما يجري حقًّا هو حدوث تفاعل بين فوتونات الضوء، يجعل فوتونات الشعاع جهةَ اليسار ترتد مبتعدة عن فوتونات الشعاع جهة اليمين.

يمكننا اختبار هذا التأثير أيضًا. يمكننا خفضُ قوة الليزر (أو نضع مرشحًا شبه معتم أمام الليزر، وهو الحل الأكثر واقعية) إلى أن يتبقى فوتون واحد فقط يمر في المرة. وإذا حدث التداخل بسببِ ارتداد بعض الفوتونات عن بعضها الآخر، فإن هذا يعني اختفاءَ تأثيرِ التداخل حين لا يوجد سوى فوتون واحد في المرة. ولكن هذا لا يحدث؛ وإنما يبقى تأثيرُ التداخل من دون تغييرٍ مهما ضعُف الشعاع. إذا رتَّبنا أن تُكتشف كل الفوتونات عند النقطة «أ»، فستكون هذه النقطة هي التي تُكتشف عندها الفوتونات، سواء أكان فوتون واحد هو الذي يمر في المرة، أو تريليون فوتون.

ما الذي يجري إذن؟ يبدو وكأن «شيئًا ما» يوجد في الشعاعَين متى مرَّ فوتون عبر النظام. يسلك هذا «الشيء» سلوك الفوتون نفسه تمامًا؛ أي إنَّ فِعل أيٍّ شيء للشعاع يحجُب الفوتونات سيوقف التداخل؛ وإذا فُعل أيُّ شيء للشعاع دون أن يؤثِّر في الفوتونات، فلن يتأثر التداخل. على الرغم من ذلك، فمتى ما نظرنا إلى كِلا الشعاعَين، لا نرصد سوى فوتون واحد في المرة، ونحن لا نرصده إلا في شعاع واحد من الاثنين، وليس في كلَيهما. بعبارة أخرى، يبدو وكأن الفوتون في «الشعاعَين كلَيهما في آنٍ واحد» حتى ننظر إليه، وحينها يقرِّر أن يكون في أحد الشعاعَين دون الآخر.

لكنَّ هذا غير منطقي على الإطلاق. فليس «النظر» في نهاية المطاف سوى عملية فيزيائية أخرى. والأجهزة التي نستخدمها لقياس وجود الفوتونات هي نفسها تتكوَّن من جسيماتٍ مجهرية تحكمها ميكانيكا الكم. وليس فِعل النظر نفسه سوى تفاعل آخر بين الأنظمةِ الفيزيائيةِ المحكومةِ هي أيضًا بميكانيكا الكم. إضافةً إلى ذلك، ينبغي ألَّا توجد قواعدُ منفصلة لكيفية تصرُّف الذرات، وفقًا لما إذا كنا نحن البشر قد خصَّصنا مجموعةً من الذرات في صورة «كاشف فوتونات» أم لم نفعل.

لمعرفةِ ما تخبِرنا به ميكانيكا الكم نفسها بشأن السلوك الذي ينبغي أن تسلُكه الكاشفات، يمكننا اللجوء إلى تجربةٍ فكريةٍ قديمة (وغير أخلاقية تمامًا) أجراها إرفين شرودنجر. لنفترض أننا نرصد لنرى بأي الشعاعَين يوجد الفوتون، وذلك عن طريقِ وَضْع كاشفٍ في كل شعاع. ولنفترض أننا نوصِّل الكاشف الموجود على اليسار — دون الكاشف الموجود على اليمين — بأداةٍ تقتل القطط، ونضع بعض الهررةِ التعيسة الحظ في نطاق تأثير الأداة.

إذا كان الفوتون في الشعاع الموجود على اليسار، فستموت القطة. وإذا كان الفوتون في الشعاع الموجود على اليمين، فستعيش القطة. أما إذا كان الفوتون في الشعاعَين في آنٍ واحد — فما يبدو أنَّ ميكانيكا الكم تخبرنا به هو أنَّ القطة ستكون في حالتَي الحياة والموت كلتَيهما، وهذا يعني أنها ستصبح حيةً وميتةً «في الوقت نفسه».

لا شك أنَّ القائمين بهذه التجربة لا يخبرون عن نتائجَ تتمثل في «رصد قطة شبه حية وشبه ميتة!» بل يقولون إن القطة إما حية وإما ميتة؛ تمامًا مثلما أنَّ الفوتونات لا تُرى في جهازَي الكشف في آنٍ واحد، بل تُرى في أحد الجهازَين في جزءٍ من الوقت، ثم تُرى في الكاشف الآخر في باقي الوقت. (وأنا أسارع بالقول إنَّ أحدًا لم ينفِّذ التجربة بقططٍ حقيقيةٍ على حدِّ علمي!)

والآن سأطرح عليكم طريقةً أخرى لتوضيح المفارقة. لقد بدأنا بفكرةِ أن الضوء يأتي في صورة جسيمات موضعية؛ ومن ثمَّ فإن حالة شعاع الليزر تتحدَّد بذِكر عدد الفوتونات الموجودة وتحديد موضعها. وبناءً على هذه الفكرة، فعندما يمر فوتون بمرآةٍ نصف عاكسة، سينتهي به الأمر إما في الشعاع المنقول أو الشعاع المنعكس؛ نحن لا نعلم في أي الشعاعَين سينتهي على وجه التحديد، ولكنه سيكون في أحدهما بالتأكيد؛ ومن ثَمَّ يمكننا استخدامُ لغة الاحتمالية لتحديد مقدار جهلنا. (أو إذا كنت تفضِّل ذلك، لتحديد نسبة المرات التي يوجد فيها الفوتون في هذا الشعاع أو ذاك؛ فأحجيات فَهْم الاحتمالية التي قابلناها في الفصل الرابع تحدُث هنا أيضًا!) وقد رأينا أن هذا التفسير يتحطَّم على صخرة التداخل، الذي يجعلنا نرى الفوتون موجودًا في الشعاعَين كلَيهما في آنٍ واحد. ولكن هذه الرؤية غير الموضعية الممتدة للفوتون نفسه تواجه عقبةً حين نقيس موضعه بالفعل؛ وفي هذه الحالة، فإن تفسيرَ الفوتون بأن له حالةً غير معروفةٍ ومؤكَّدة الموضع، يسود مرةً أخرى؛ ومن ثَم ينبغي إسقاط تفسير أن الفوتون له حالةٌ معروفةٌ وغير مؤكَّدة الموضع. يبدو أننا مضطرون إلى التنقُّل فيما بين التفسيرات بشكلٍ غير متَّسقٍ بناءً على سِمات التجربة التي نرغب في وصفها.

من المنظور الشكلي، فإن رياضيات التداخل مكافئةٌ لرياضيات الموجات؛ ولهذا سُميت هذه الحالة من عدم التناسق في التفسيرات «ازدواجية الموجة والجسيم» (ولا يزال الاسم مستخدمًا بالفعل في الكتب القديمة، وفي كثيرٍ من كتب العلوم المبسَّطة). لكن من الأفضل أن نفهمه على أنه حالةٌ من عدم الاتساق في تفسير النظام الذي تقدِّمه ميكانيكا الكم: فنحن أمام خيارَين وهما (١) قصة الخصائص غير المحدَّدة وغير الموضعية ولكنها معروفةٌ («الوصف غير المحدَّد»)؛ (٢) قصة الخصائص المحدَّدة والموضعية ولكنها مجهولةٌ («وصف الاحتمالية»). يبدو أن التداخل يحتاج إلى الوصف غير المحدَّد، وأن القياس يحتاج إلى وصف الاحتمالية. وتُسمَّى المسألة المتعلقة بكيفية فَهْم النظرية — بالنظر إلى الحاجة الواضحة لكلٍّ من الخيارَين (١) و(٢) والتعارض الواضح بينهما — بـ «مشكلة القياس».

الحالات الكمية والتراكب الكمي

للفيزياء لغةٌ لوَصْف حالة عدم التحديد التي تكون عليها الفوتونات (أو أي شيء آخر). إذا كان بإمكان الجسيم أن يكون في حالتَين، يمكنه أيضًا أن يكون في حالة «تراكب» بين

الحالتَين. وباستخدام الترميز الذي طوَّره عالِم الفيزياء بول ديراك، يمكننا كتابة حالة التراكب بالصيغة التالية:

|STATE> = a|here> + b|there>

يُطلَق على |STATE> اسم «الحالة الكمية» للجسيم، وتدور نظرية الكم وفلسفتها في الأساس حول كيفية تطوُّر هذه الحالة وكيفية تفسيرها. الحدان ‘a’ و‘b’ يمثِّلان «السعة»، وهما كِيانان رياضيان (أعداد مركَّبة على وجه التحديد) يتضمن كلٌّ منهما «مقدارًا» (عددًا حقيقيًّا موجبًا مكتوبًا بالصيغة |a|) و«طورًا» (ويمكن اعتباره زاوية). يُعَد العدد المركَّب سهمًا صغيرًا يعبِّر طوله عن مقداره، وتعبِّر زاويته إلى المحور س عن طوره. تصف هاتان السَّعتان نمطَي التداخل والاحتمالية لميكانيكا الكم. وبالنسبة إلى الاحتمالات؛ إذا قسنا موضعَ هذا الجسيم، فإن احتمالية وجوده في الحالة ‘here’ تساوي تربيع مقدار السعة للاحتمالية ‘here’: Prob (here) = $|a|^2$. وينطبق الأمر نفسُه على الاحتمالية ‘there’. يُطلَق على هذه القاعدة الاحتمالية اسم «قاعدة بورن» نسبةً إلى العالم ماكس بورن الذي اقترحها في الأساس؛ والحق أنَّ الغالبية العظمى من البراهين في ميكانيكا الكم تعتمد عليها اعتمادًا كبيرًا.

إنَّ قاعدة بورن تجعل الحالةَ الكمومية |STATE> شبيهةً بتوزيع الاحتمالية إلى حدٍّ ما؛ فالقول إن الجسيم ينطوي على الحالة |STATE> باعتبارها حالته الكمية شبيهٌ إلى حدٍّ ما بالقول إنَّ

‘here’ (Probability $|a|^2$)   ‘there’ (Probability $|b|^2$)

لكن الأمر المهم أنه يمكن لحالتَين كميتَين أن تخصِّصا لناتجٍ ما سَعةً ناتجةً لها مقدار واحد وأطوار مختلفة، وتؤثِّر الأطوار في كيفية تطوُّر النظام بمرور الوقت، بما في ذلك إمكانيةُ تداخل المسارات المختلفة التي قد يتخذها النظام بعضها مع بعض. إضافةً إلى ذلك، فإنَّ إحلال الحد −b محلَّ الحد في الحالة الكمومية |STATE> لا يُحدِث فرقًا في الاحتمالات، ولكنه يحدِث فرقًا في كيفية تطوُّر الحالة الكمومية |STATE> بمرور الوقت، مما قد يشكِّل بدوره فرقًا كبيرًا فيما ستكون عليه الاحتمالات الخاصة بالقياسات المستقبلية.

نرى في الحالة |STATE> تجسيدًا مباشرًا للوصفَين المتناقضَين للأنظمة الكمية التي ناقشناها في القسم الأخير. فحين نرغب في فَهْم تأثير قياس نظامٍ ما، فإنَّ تفسير الاحتمالية

للحالة الكمومية |STATE> أمرٌ طبيعي: إذا كان الحد |STATE> هو محضَ طريقة رياضية لقولِ إن النظام يمكن أن يكون هنا أو يمكن أن يكون هناك؛ فحينها تصبح الاحتمالات؛ ومن ثمَّ حالات التراكب، غيرَ غامضة. لكننا لا نستطيع فَهْم |STATE> بهذه الطريقة إذا كنَّا معنيِّين بديناميكا النظام، لن نفهمها على الأقل إذا كانت هذه الديناميكا تنطوي على خاصية التداخل؛ إذ إنَّ تفسير الحالة الكمومية |STATE> بصفتها توزيعًا للاحتمالية يؤدي إلى فقدان القدرة على تتبُّع المعلومات المتعلِّقة بالطور، وهي معلومات يترتَّب عليها عواقبُ مهمة من الناحية التجريبية.

على الرغم من ذلك، إذا كان تفسير الاحتمالية للحالة الكمومية |STATE> يبدو إشكاليًّا، فلن يكون تفسيرُ التداخل أفضلَ بكثير. مرة أخرى، تخيَّل قطة شرودنجر البائسة التي يمكن كتابة حالتها بالصيغة التالية:

$$|\text{CAT STATE}> = \left(1/\sqrt{2}\right)(|\text{ALIVE}> + |\text{DEAD}>)$$

هذه حالة تراكُب تتساوى فيها النتيجة: «القطة حية» |ALIVE> والنتيجة: «القطة ميتة» |DEAD>، وكذلك يخبرنا تطبيقُ قاعدة بورن للاحتمالية بأن القياس أيضًا تتساوى فيه احتمالاتُ العثور على القطة حية والعثور عليها ميتة. (كلُّ ما يفعله الحد ($1/\sqrt{2}$) هو ضمان أنَّ مجموع مربَّعي السَّعة يساوي ١). وفي تفسير الاحتمالية للحد |CAT STATE>، لا شيء من هذا غامض على وجه الخصوص؛ فهو لا يعبِّر إلا عن قطةٍ تتساوى احتمالية أن تكون حيةً مع احتمالية أن تكون ميتة، ويخبرنا القياسُ أيهما هي الحالة الصحيحة.

لكن إذا كان الحد |CAT STATE> يعبِّر عن الحالة الفعلية المادية للقطة، فسيبدو أن ثمَّة خطأً فادحًا؛ فتلك الحالة — قطة نصف ميتة ونصف حية — غريبةٌ للغاية ومن نوعٍ لم يسمع به أحدٌ من قبل، ولا وجود لقاعدة بورن التي تتنبأ بأن النتيجة الفعلية حين القياس هي احتمالية وجود القطة حية بنسبة ٥٠ بالمائة، واحتمالية وجودها ميتة بنسبة ٥٠ بالمائة. (الحق أنه لا وجود للاحتمالات بوجهٍ عام إذا فهمنا |CAT STATE> بهذه الطريقة.)

من الواضح إذن أنه لا يمكن فَهْم الحالة الكمية على أنها تصف الخصائصَ المادية الفعلية للنظام (كما في الميكانيكا الكلاسيكية) أو على أنها تصف احتمالاتِ امتلاك النظام خصائصَ متنوعةً (كما في الميكانيكا الإحصائية). تحتد المعضلة بدرجةٍ أكبرَ حين ندرُس الحالة الكمية لعدة أنظمة، والخاصية اللافتة للنظر المسمَّاة «التشابك».

الترابط والتشابك

تتسم الجسيمات الكمية — كالإلكترونات على سبيل المثال — بخاصيةٍ تسمَّى «الدوران». وتقريبًا، يمكن القول إنَّ خاصية الدوران تشفِّر دوران الإلكترون حول محوره، لكنها أغرب من ذلك؛ الحق أنَّ أوجهَ غرابتها يمكن أن تستغرق فصلًا بأكمله من هذا الكتاب، لكنني سأنصرف عن مناقشتها إلى حدٍّ كبير. وسأكتفي بالقول إنه يمكن قياس دوران الإلكترون في الفضاء في اتجاهه، أيًّا كان، ولن يؤدي القياسُ إلا إلى نتيجتَين يمكن أن نطلق عليهما «الدوران لأعلى» و«الدوران لأسفل». (وبصرف النظر عن السمات التي تنبئ عن مكان الإلكترون في الفضاء والتركيز على الدوران فقط)، يمكن كتابةُ الحالة الكمية العامة للإلكترون بالصيغة التالية:

$$|\text{ELECTRON}> = a|\text{UP}> + b|\text{DOWN}>$$

حيث تصبح قيمة $|\text{UP}>$ وقيمة $|\text{DOWN}>$ نسبيَّتَين إلى اتجاهٍ ثابت نختار أن نقيسَ الدوران فيه.

لِندرُس الآن اثنين من مثلِ هذه الإلكترونات. إذا قسنا دورانَ كلٍّ منهما على حدة، فستكون لدينا أربع نتائج محتملة: «الدوران لأعلى» لكلَيهما — «الدوران لأسفل» لكلَيهما — «الدوران لأعلى/الدوران لأسفل» — «الدوران لأسفل/الدوران لأعلى». ومن ثَمَّ يمكن كتابةُ الحالة الكمية العامة للإلكترونَين بالصيغة التالية:

$$|\text{TWO ELECTRONS}> = a|\text{UP, UP}> + b|\text{UP, DOWN}> + c|\text{DOWN, UP}> + d|\text{DOWN, DOWN}>.$$

من الطبيعي أن نسأل: ما حالةُ كل إلكترون من الإلكترونَين على حدةٍ بناءً على حالة الإلكترونَين معًا؟ من اللافت للنظر أنَّ هذه الحالات قد لا توجد أصلًا. فَلْنتخيَّل ما يلي: إذا كان لكل إلكترون حالته الخاصة، فستُحدِّد تلك الحالة (بناءً على قاعدة بورن للاحتمالية) احتمالاتِ الحصول على نتيجة «الدوران لأعلى» أو نتيجة «الدوران لأسفل» عند قياس الدوران. ولما كانت تلك الاحتمالات لا تتحدَّد إلا بالحالة وحدَها، فليس ثمة إمكانيةٌ لوجود ارتباطٍ بين القياسات؛ أي لا توجد إمكانيةٌ بأن يؤديَ قياس دوران أحد الإلكترونات إلى معرفة معلوماتٍ عن نتيجة قياس إلكترون آخر.

على الرغم من ذلك، فمن السهل كتابةُ الحالتَين الكموميتَين لإلكترونَين لا تنطبق عليهما هذه الحالة، على سبيل المثال:

$$|\text{SINGLET}> = \left(1/\sqrt{2}\right)(|\text{UP, DOWN}> - |\text{DOWN, UP}>)$$

إذا قِسنا دورانَ الإلكترونَين حين يكونان في الحالة: |SINGLET> أي الأحادية، فسيكون لدينا — طبقًا لقاعدة بورن كما هو الحال دومًا — احتماليةٌ بنسبة ٥٠ بالمائة للحصول على النتيجة «الدوران لأعلى/الدوران لأسفل»، واحتمالية بنسبة ٥٠ بالمائة للحصول على النتيجة «الدوران لأسفل/الدوران لأعلى»، ولن توجد أيُّ احتمالية على الإطلاق لأن تكون نتيجة الدوران واحدةً للإلكترونَين عند قياسها لكلَيهما. وبناءً على هذا، يوجد انتفاءٌ تامٌّ للارتباط بين نتائج قياس الدوران للإلكترونَين؛ ومن ثَمَّ انتفاء احتمالية تعيين حالتَين كموميتَين منفصلتَين للإلكترونَين. يُطلق على هذه الحالات اسم «الحالات غير المنفصِلة» أو — بلغة شاعرية — «الحالات المتشابكة»؛ وهي حالات لا يمكن وصفُها إلا مجتمعة وليس من حيث السِّمات المنفصِلة لمكوِّنات النظام.

إذا كانت حالةُ زوج من الإلكترونات هي |SINGLET>، وقِيسَ دوران أحدِ الإلكترونَين، فيمكن التنبؤ بنتيجة دوران الإلكترون الآخر بنسبة نجاح تبلغ ١٠٠ بالمائة، بغض النظر عن مدى التباعد بينهما. وعما إذا كان هذا يبدو غريبًا أم عاديًّا؛ فذلك يعتمد اعتمادًا كبيرًا على طريقةِ تفكيرنا بشأن الحالات الكمية. إذا كنا نرى هذه الحالاتِ الكميةَ بصفتها احتمالات، فلن يكون هذا الارتباط الوثيق غامضًا في حد ذاته: إذا كنت تعرف مثلًا أنَّ ثمَّة بطاقةً بيضاء وبطاقة سوداء وُضِعتا في ظرفين ثم خُلط الظرفان، وعند فتح الظرف الأول وجدت البطاقةَ البيضاء، فأنت تعلم يقينًا أن الظرف الآخر يحتوي على البطاقة السوداء حتى إذا كانت بينهما مسافةُ أميال؛ وليس هذا بسبب سِمة اللامحلية الغامضة. وعلى الجانب الآخر، إذا كانت حالةٌ أحادية تصف (الدوران لأعلى هنا، الدوران لأسفل هناك) و(الدوران لأسفل هنا، الدوران لأعلى هناك) بالتزامن معًا — أيًّا ما كان يعنيه ذلك — فقبل القياس تكون حالتا الإلكترونَين غيرَ محدَّدتَين ثم تصبحان محدَّدتَين بعد القياس، ويبدو أن التحوُّل من الحالة غير المحدَّدة إلى المحدَّدة تحدُث على الفور مهما كانت المسافة بين الإلكترونَين.

ربما يبدو في هذا دعمًا لتفسير الاحتمالية للحالة، ودعمًا لفكرةِ أن «التشابك» ليس إلا مرادفًا لكلمة «الارتباط». لكن التشابك الكمي لا يمكن فَهْمه بهذه البساطة الشديدة،

حتى إذا نحَّينا جانبًا الصعوباتِ العميقةَ التي يفرضها التداخل على تفسير الاحتمالية للحالات الكمية، وهذا ما سنراه عَبْر دراسة لعبة بسيطة وتأثيراتها البارزة.

مبرهنة بيل وضرورة اللامحلية

تحظى الألعاب التعاونية — التي يتعاون فيها اللاعبون لتحقيقِ هدفٍ مشترَك — برواج كبير في هذه الأيام. وصحيح أنَّ «لعبة بيل»، وهي لعبة تعاونية يمارسها لاعبان، لا تستطيع أن تنافس الألعابَ الأكثر إمتاعًا، لكن أهميتها الفلسفية تعوِّض ما تفتقر إليه في عنصر التسلية. لممارسة هذه اللعبة، نحتاج إلى عملتَين معدنيتَين وبطاقتَين وغرفتَين؛ إذ يحصل كلٌّ لاعب على واحدةٍ من كل زوج. قد تستقر العملتان على «الصورة» أو «الكتابة» عند رميهما؛ وللبطاقتَين وجهٌ أبيض وآخرُ أسود؛ ويجب أن تكون كلٌّ من الغرفتَين بعيدةً عن الأخرى ومقفلة.

سأوضح الآن كيف يمكننا أن نلعب أنا وأنت جولةً من اللعبة. ندخل الغرفتَين ويقلب كلٌّ منَّا عملته المعدنية. بعد ذلك نضع البطاقتَين بحيث إما أن يكون الوجه الأبيض إلى الأعلى أو الأسود. والحق أنَّ شروط الفوز غريبةٌ بعض الشيء: فنحن نفوز إذا وضع كلانا البطاقتَين على الوجه نفسه (كلتا البطاقتَين على الوجه الأبيض أو كلتاهما على الوجه الأسود)؛ «إلا» إذا استقرَّت العملتان على «الكتابة» حين نقلبهما، فحينها نفوز إذا اختلف الوجه العلوي للبطاقتَين (أسود/أبيض أو أبيض/أسود). نلعب عدةَ جولات، وفي النهاية نحسب النقاط: النقاط هي المرَّات التي فزنا فيها. وفيما يلي ملخَّص القواعد:

عملتِي المعدنية	عملتك المعدنية	شروط الفوز
صورة	صورة	تطابُق وجهَي البطاقتَين العلويين
صورة	كتابة	تطابُق وجهَي البطاقتَين العلويين
كتابة	صورة	تطابُق وجهَي البطاقتَين العلويين
كتابة	كتابة	اختلاف وجهَي البطاقتَين العلويين

قبل بدءِ اللعب، يمكننا مقارنةُ الملاحظات كي يمكننا التوصُّل إلى أفضل استراتيجية ممكنة. فمن الاستراتيجيات الوجيهة على سبيل المثال، أن نتَّفق على وضع البطاقتَين دومًا بحيث يكون الوجه الأبيض إلى أعلى مهما كانت الظروف. ووفقًا لتلك الاستراتيجية، سنفوز في ثلاثة أرباع المرات، ولن نخسر إلا إذا استقرت العملتان على وجه الكتابة.

ماذا إذا كنا نريد أداءً أفضل؛ أي إذا أردنا ألا نكتفيَ بالفوز في ثلاثة أرباع المرات بل في كل المرات؟ لن تجد صعوبةً في إقناع نفسك باستحالة ذلك. لنفترض مثلًا أننا اتفقنا على أنك ستجعل وجهَ الورقة الأبيض هو الأعلى مهما حدث. سأحتاج أنا إلى وضع الوجه الأسود لأعلى إذا استقرَّت العملتان على وجه «الكتابة»، وأن أضع الوجه الأبيض لأعلى إذا كانت إحدى العملتَين فقط هي التي استقرَّت على وجه «الكتابة»؛ لكنني كي أتمكنَ من ذلك، سأحتاج إلى رؤية عملتك مثلما سأحتاج إلى رؤية عملتِي، وكلاهما في غرفة مختلفة. لا سبيل إذن إلى تجنُّب لعب البطاقة الخطأ في بعض الأحيان، وبهذا يؤدي احتمال واحد على الأقل من بين التوفيقات الأربعة المحتملة لقلب العملتَين في الهواء إلى خسارتنا. ونحن نواجه مشكلاتٍ مماثلةً أيًّا كانت الاستراتيجية التي نتَّبعها؛ إذ لا يستطيع كِلانا سوى رؤية عملته؛ ولأن شروط الفوز تعتمد على خاصيةٍ مشتركة بين العملتَين، فثمة نتيجةٌ واحدة على الأقل من النتائج الأربع لقلب العملتَين في الهواء ستؤدي إلى خسارتنا. ولهذا لا يمكننا الحصول على نتيجةٍ أفضل من ٧٥ بالمائة.

ماذا لو سمحْنا بالعشوائية في الاستراتيجيات؟ يمكننا مثلًا أن نقرِّر مقدَّمًا اتباعَ استراتيجية مختلِفة في كل جولة من اللعبة، يمكننا حتى أن نتخذَ هذا القرار وفقًا لقلب العملة في الهواء أو دحرجة النَّرد. وهذا أيضًا لن يفيد. ذلك أنه لا توجد استراتيجيةٌ من الاستراتيجيات «الخالصة» (غير العشوائية) تحقِّق نسبة نجاح أكبرَ من ٧٥ بالمائة؛ ولهذا لا يزيد النجاح الذي يحقِّقه مَزْج هذه الاستراتيجيات عشوائيًّا عن ٧٥ بالمائة هو الآخر.

لكن لنفترض أننا توصَّلنا إلى لاعبَين في هذه اللعبة تمكَّنا بالفعل من تحقيق نجاحٍ يتجاوز ٧٥ بالمائة. فكيف تأتَّى لهما فِعل ذلك؟ الاحتمالية الواضحة هي أنهما يغُشَّان؛ فربما أدخلا هاتفَين محمولَين أو ما شابه خلسةً إلى الغرفتَين، وراحا يقارنان الملاحظات. يبدو إذن أننا أثبتنا أنه من دون الغش بتلك الطريقة، فأفضل درجة يمكن الحصول عليها في لعبة بيل هي ٧٥ بالمائة؛ ومن ثمَّ فإن تحقيقَ درجةٍ تزيد على ٧٥ بالمائة هو دليل على الغش.

لنفترض أننا نهتم «حقًّا» بمنع الغش. إليكم طريقة مؤكَّدة لتحقيق ذلك؛ وهي الحرص على أن تكون المسافة بين الغرفتَين كبيرةً، بحيث لا يتمكن حتى الضوءُ من الانتقال من غرفةٍ إلى أخرى في أثناء ممارسة اللعبة. (ربما تكون الغرفة الأولى على الأرض، والغرفة الثانية في مدارٍ حول كوكب المشتري، ولن نمارس اللعبة إلا لمدة عشر دقائق، أقل من المدة التي يستغرقها الضوء للسفر بين الكوكبَين، وهي من ٣٥ إلى ٥٠ دقيقة). في هذه الحالة، يبدو الغش مستحيلًا من الناحية الفيزيائية؛ إذ إنه سيتطلَّب إشارةً أسرعَ من الضوء.

يُطلَق على النتيجة المتمثِّلة في أن ٧٥ بالمائة هي أقصى درجة ممكنة في لعبة بيل من دون وجود إشارة بين الغرفتَين — اسم «متباينة بيل» نسبة إلى عالِم الفيزياء جون بيل. إذا كُسر حاجزُ هذه النتيجة، فسيعني ذلك، على ما يبدو، أنه توجد إشارةٌ تسافر بين الغرفتَين اللتَين تُمارَس فيهما اللعبة؛ وإذا كانت المسافة بين الغرفتَين كبيرةً ولا يَسَع الضوء أن يسافر بينهما، فلا بد أن تكون هذه الإشارة أسرعَ من الضوء.

في تجربةٍ بارزةٍ أُجريت في باريس عام ١٩٨٦، أعدَّ آلان أسبكت جهازًا مارسَ لعبةَ بيل فعليًّا وفاز فيها بنسبةٍ تزيد على ٧٥ بالمائة من الوقت، لكنه لم يفُز في كل المرات. (استخدمَ أسبكت أجهزةً للتوزيع العشوائي بدلًا من البشر، ويبدو نموذج المتباينة التفصيلي الذي أخلَّ به مختلفًا عن نموذج نسبة الـ ٧٥ بالمائة الذي استخدمناه هنا، لكن الأفكار الأساسية لكلَيهما واحدة). ومنذ ذلك الوقت، تكرَّرت نتيجةُ أسبكت مرةً بعد مرة. فلنتناول الآن تلك الطريقةَ وكيفية تنفيذها: نولِّد أزواجًا من الجسيمات في الحالة الأحادية |SINGLET>، ونرسلها إلى الغرفتَين. وفي كل غرفة، قاسَ اللاعب (أو بالأحرى مجموعة الدوائر المؤتمتة التي تحلُّ محلَّ اللاعب) دوران الجسيم في أحد الاتجاهَين المحتملَين، مع تحديدِ اختيار الاتجاه عشوائيًّا عن طريق القرعة بالعملة المعدنية (عن طريق جهاز ميكانيكي يقوم بالتوزيع العشوائي في حقيقة الأمر). تُفسَّر نتيجةُ الدوران لأعلى على أنها وضْع وجه البطاقة «الأبيض» لأعلى، بينما تُفسَّر نتيجةُ الدوران لأسفل على أنها وضْع وجه البطاقة «الأسود» لأعلى. وعلى خلاف مناقشتنا السابقة للحالة الأحادية |SINGLET>، فليست اتجاهاتُ القياس واحدة في حالة كل جسيم؛ لذلك لن نتنبأ بالارتباط المعاكس المثالي للنتائج: ما تتنبأ به نظريةُ الكم هو أن الارتباط المعاكس يصبح أضعفَ تدريجيًّا مع تباعُد اتجاهات القياس.

صحيحٌ أنَّ الرياضيات ذات الصلة تفوق مستوى هذا الكتاب، لكن سيكون من السهل وصفُ النتيجة النهائية؛ إذا نفَّذنا هذا البروتوكول: إعداد تسلسلات حالات الدوران

وقياسها، فستصبح نتيجةُ لعبة بيل حوالي ٨٥ بالمائة؛ أي أعلى من الحد الذي تنص عليه متباينة بيل.

أول ما يمكننا استنتاجُه من هذا هو أنَّ التشابك الكمي أعقدُ من الترابط الاحتمالي. إذا استطعنا بشكلٍ ما أن ننظر إلى الحالة الأحادية |SINGLET> على أنها تصِف زوجًا من حالات الدوران المحدَّدة لكنها مرتبطة عكسيًّا، فإن قياسات هذه الدورانات ستضم مزيجًا عشوائيًّا (وبالغ التعقيد) من الاستراتيجيات، وقد رأينا أنه ما من مزيجٍ كهذا يمكن أن يتخطَّى حاجزَ ٧٥ بالمائة. أيًّا يكن التشابك الكمي، فهو أغربُ مما في تصوُّرنا، ويبدو بالفعل أنَّ اللامحلية سِمة أصيلة من سِماته. ذلك أنَّ الارتباطات بين قياسات الدوران عند قياس |SINGLET> أقوى كثيرًا من أن تُعزى إلى أي وصفٍ محلي أساسي.

غير أننا نستطيع أن نتعلَّم من التجارب التي تخلُّ بمتباينة بيل ما هو أكثر من هذا بكثير. ذلك أنَّ ما اشتققناه من المتباينة لم يَستخدم ميكانيكا الكم في نهاية المطاف؛ وإنما كان محضَ توضيحٍ لأن أيَّ استراتيجية تكسر حاجز الـ ٧٥ بالمائة في درجات لعبة بيل، لا بد أنها تستخدم نوعًا من التفاعلات الأسرع من الضوء. وقد نجحت تجربةُ أسبكت وما تلاها من تجاربَ في تخطِّي حاجز تلك الدرجة. إذن، حتى إن ثبَت بُطلان ميكانيكا الكم غدًا، فإن التجربة تُعَد برهانًا تجريبيًّا مباشرًا على أن العالم ينطوي على عملياتٍ تحدُث بسرعة أكبرَ من سرعة الضوء، بل إنها عملياتٌ تحدُث بسرعة اعتباطية وعلى نحوٍ آنيٍّ.

غير أنَّ هذا الاستنتاج محلُّ خلافٍ حادٍّ. فمعظم علماء الفيزياء لا يقبلون بوجود عملياتٍ في الطبيعة تحدُث بسرعةٍ أكبرَ من سرعة الضوء؛ إذ إنهم يشيرون إلى التعارض بين نظرية النسبية الخاصة ووجود هذه التفاعلات، كما يشيرون إلى «نظرية عدم الاتصال»، وهي نتيجةٌ مباشرة لميكانيكا الكم، توضِّح أنه لا يمكن على أي حال استخدامُ أي عمليةٍ فيزيائيةٍ متَّسقةٍ مع ميكانيكا الكم، لإرسال معلوماتٍ فعليةٍ وقابلةٍ للاستخدام بسرعةٍ أكبر من سرعة الضوء. (لذا، إذا كانت هناك تأثيراتٌ أسرعُ من الضوء تُسهِم بشكلٍ ما في الإخلال بمتباينة بيل، فإنها ستكون مخفيةً بعيدًا وربما بشكلٍ تآمري؛ كي لا نستطيع اكتشافها مباشرةً.) أما كيف يمكن التوفيق بين استحالة إرسال إشاراتٍ بسرعةٍ أكبرَ من الضوء وبين متباينة بيل والإخلال بها، فهذه مسألةٌ خلافيةٌ وغير واضحة.

إنَّ هذه الألغاز — مسألة القياس وتفسير الحالة الكمية، وطبيعة التشابك الكمي، وسِمة اللامحلية التي يشير إليها الإخلال بمتباينة بيل — هي «حقائقُ موجودة بالفعل» لا بد أن تتناولها أيُّ محاولةٍ لفَهْم ميكانيكا الكم. وينبغي أن يكون واضحًا بالفعل أنَّ

توفيرَ امتدادٍ بسيطٍ لإطار الميكانيكا الكلاسيكية (أو الميكانيكا الإحصائية في الحقيقة) أمرٌ مُستبعَد؛ فمن الجلي أن فَهْم ميكانيكا الكم يتطلَّب تغييرًا في التوجُّه الفلسفي، أو في الفيزياء نفسِها، أو في كلَيهما. وفي الفصل السادس، سنرى كيفيةَ تحقيق ذلك، ونتعرَّف على سببِ أهميته.

الفصل السادس

تفسير الكم

كان الفصل الخامس سلبيًّا في معظمه؛ فقد حاولت أن أوضح وأبيِّن مدى غرابة ميكانيكا الكم ومدى حدةِ العوائق التي تقف في طريق فَهْمها. لكن هذا لا يعني أن فَهْمها أمرٌ مستحيل. فمنذ ميلاد ميكانيكا الكم، لم يزل علماء الفيزياء والفلاسفة يتناقشون بشأن معناها، وقد شهدت السنوات الأربعون الماضية تقدمًا كبيرًا في فَهْم الخيارات، حتى وإن لم يجارِ هذا التقدمَ تطويرُ توافقٍ في الآراء.

في هذا الفصل الأخير، سأناقش بعضًا من أشهرِ وأهم الاستراتيجيات التي صِيغَت لفَهْم ميكانيكا الكم. وسأعترف أنني أرى أنَّ آخرَ نظرية أتناولها — وهي تفسير إيفريت — هي الصحيحة على الأرجح. لكني لا أهدف في هذا الفصل إلى الدفاع عن نهجٍ بعينه، بل توضيح مدى الأهمية الفلسفية والعلمية لهذه المسألة. فالتوصُّل إلى طريقة للتفكير بشأن ميكانيكا الكم وفَهْمها أمرٌ مهم؛ فقد أدَّى هذا المجال إلى نتائجَ علمية بارزة ومن المحتمل أن يؤديَ إلى المزيد من مثل هذه النتائج.

الاحتمالات والقياسات

تذكَّر وصفي لكيفية تعامُل الفيزياء عمليًّا مع الحالة الكمية؛ إذ تتعامل معها بشكل غير متَّسق؛ إما باعتبارها وصفًا احتماليًّا لحالةٍ مجهولة للنظام لكنها محدَّدة، وإما باعتبارها وصفًا فيزيائيًّا لحالة النظام غير المحدَّدة. إنَّ معظمَ الطرق المستخدَمة لفَهْم ميكانيكا الكم يلتزم بنهجٍ أو بآخر، ثم يحاول حلَّ المفارقات الظاهرة في هذا النهج. وفي هذا الفصل، سنبدأ بالنهج الاحتمالي.

لنتناول الإلكترون الدوار مرةً أخرى باعتباره نموذجًا للنظام الكمي؛ يمكن كتابةُ الحالة العامة للإلكترون بالصيغة التالية:

$$|\text{STATE}> = a|\text{UP}> + b|\text{DOWN}>$$

وتخبرنا قاعدة بورن للاحتمالية أنه إذا قِسنا دورانَ الإلكترون (على طول محورٍ ثابتٍ كالمعتاد)، فستكون احتمالية الحصول على نتيجة «الدوران لأعلى» هي $|a|^2$، واحتمالية الحصول على نتيجةِ «الدوران لأسفل» هي $|b|^2$. ومثلما شرحتُ في الفصل الخامس، فإنَّ هذه القاعدة للاحتمالية لا تُعنى إلا بسَعة الحد ’a‘ والحد ’b‘، ولا تهتم بالأطوار؛ لكن الأطوار مهمة لأنها تؤثِّر في كيفية تطوُّر الحالة، لا سيما في كيفية حدوث التداخل.

على الرغم من ذلك، توجد طريقةٌ للتوصُّل إلى هذه الأطوار عَبْر القياس، ما دُمنا نتذكَّر أنه يمكن قياسُ أكثرَ من شيء واحد. لنفترض أننا بدلًا من ذلك نقيس الدوران على طول محورٍ جديدٍ بزاويةٍ قائمةٍ إلى المحور القديم (ولنقُل إن المحور القديم هو المحور z والمحور الجديد هو المحور x). عندئذٍ تنصُّ قوانين نظرية الكم أن هذه الحالة نفسها يمكن كتابتها بالصيغة التالية:

$$|\text{STATE}> = (a + b)\ /\sqrt{2}|\text{UP};\ x> + (a - b)\ /\sqrt{2}|\text{DOWN};\ x>$$

ومن ثمَّ فإن احتماليةَ الحصول على النتيجة «الدوران لأعلى» بناءً على قياس المحور x تساوي ($|a + b|^2/2$)، وهذه النتيجة لا تعتمد على سَعة a وb فحسب، بل على أطوارهما أيضًا. (وهنا، فإن الحالة $|\text{UP};\ x>$ والحالة $|\text{DOWN};\ x>$ هما حالتا الدوران لأعلى أو لأسفل بالنسبة إلى المحور الجديد). وبناءً على هذا، ينبغي ألَّا تُعتبر الأطوار أنها تحمل معلوماتٍ ديناميكيةً وحسب، بل تحمل معلوماتٍ عن نتائج القياسات الأخرى.

(ليس هذان التفسيران سوى وجهَين للعملة نفسها في واقع الأمر. تتمثَّل إحدى طرق قياس الدوران على المحور x في تدوير النظام بمقدار ٩٠ درجة، بحيث يتحوَّل المحور x إلى المحور z، ثم قياس الدوران على المحور z. فالقدرةُ على إجراء قياسٍ بالنسبة إلى أي محورٍ تُعادل القدرةَ على تطبيق تحويلاتٍ ديناميكيةٍ عشوائيةٍ على نظامٍ ما، ثم إجراء قياساتٍ بالنسبة إلى محورٍ ثابت.)

كل هذا يعمَّم على اتجاهات القياس الأخرى، وعلى غير ذلك من الأنظمة الكمية بالطبع. وليس من الصعب إثباتُ ذلك إذا توفَّرت لدينا احتمالات كل نتيجةٍ لكل قياسٍ يمكن إجراؤه على نظامٍ ما؛ إذ سيصبح هذا كافيًا للتوصُّل إلى الحالة الكمية الكاملة.

ما الذي يلزم أيضًا لفَهْم الحالة الكمية وفقًا للتفسير الاحتمالي؟ كلُّ ما يستلزمه الأمر هو ما يلي: تعيين خصائص فعلية للنظام تُمكِّننا من فَهْم القياسات الكمية، باعتبارها تقاريرَ غير فاعلةٍ لماهية هذه الخصائص، وفَهْم الحالة الكمية باعتبار أنها تحدِّد احتمالية أن النظام يحتوي على مجموعة محدَّدة من الخصائص. (هذا ما توفِّره لنا الميكانيكا الكلاسيكية الإحصائية: الخصائص الأساسية الكامنة هي السرعات المتجهة للجسيمات التي يتكوَّن منها النظام ومواضعها الفعلية؛ أما الاحتمالات الإحصائية فهي تشفِّر مدى احتمالية أن يكون لهذه المواضع والسرعات المتجهة أيُّ قيمة محددة.)

رأينا في الفصل الخامس أن التداخل يبدو وكأنه يمنع حدوثَ ذلك بأي شكل مباشر: لا يمكن أن يوجد الفوتون في قناة أو أخرى؛ لأن هذا لا يفسِّر التداخل، ولا يمكن للفوتون أن ينتشر عَبْر القناتَين؛ لأن هذا لا يُفسِّر السببَ في أننا نقيسه دومًا في قناةٍ واحدةٍ دون الأخرى. الحق أنه يمكن صَقْل هذه الحجة لتزداد دقَّتها. فحتى الآن، أدَّت النتائج الرياضية القوية — مبرهنة كوخن-سبيكر، ومبرهنة جليسون، ومبرهنة بيوسي-باريت-رودولف — إلى إقناع كلٍّ من المنخرطين في المجال (تقريبًا) بأن هذه الاستراتيجية غير محتملة. (وتخبرنا متباينة بيل أن أي استراتيجية من هذه النوعية لا بد أن تتضمَّن تفاعلاتٍ أسرعَ من الضوء).

على الرغم من ذلك، توجد استراتيجية بديلة: تمسَّك بفكرة أن الحالة الكمية تُفهم من حيث احتمالات النتائج المتنوِّعة للقياس، لكن تخلَّ عن فكرة أن نتائج القياس تلك هي تقارير بشأن الخصائص الموجودة مسبقًا التي يتضمنها النظام. ومن هذا المنظور، تُعَد الحالة الكمية أداةً رياضية تُستخدم لتلخيصِ ما يحدث، عندما يجري علماء الفيزياء عملياتٍ متنوِّعة في المختبر؛ ومن ثَم فإنَّ أي محاولةٍ لفهمِ هذه العمليات باعتبارها قياساتٍ لواقع ضمني، أو لفهم نظريةِ الكم باعتبارها وصفًا للعالم في حد ذاته وليس باعتبارها محضَ خوارزمية للتنبؤ بنتائج القياس، تُنحَّى جانبًا.

إنَّ هذا النهج لفَهْم ميكانيكا الكم من تنويعاتِ مذهب الذرائعية، وهو أحدُ مناهج فلسفة العلوم التي تناولناها في الفصل الأول؛ وهو يقضي بألَّا نرى ميكانيكا الكم باعتبارها وصفًا للعالَم، بل أداة لوصف نتائج التجارب. وفي النُّهج الذرائعية، فإنَّ الأسئلة بشأنِ ما يفعله النظام في أثناء عدم قياسنا له، على غرار السؤال عما تفعله قطة شرودنجر المسكينة حين نفتح الصندوق الذي تُوجَد فيه، تُنحَّى جانبًا بوصفها أسئلةً عديمة الجدوى؛ فنحن لا نطرحها إلا إذا لم نفهم ماهية نظرية ميكانيكا الكم.

توجد مثل هذه الاقتراحات فيما يتعلَّق بنظرية الكم منذ عشرينيات القرن العشرين (فقد كان نيلز بور وفيرنر هايزنبرغ مؤيدَين لها بدرجات متفاوتة، وهما من مؤسسي عالَم الكم)، وهي لا تزال رائجةً في بعض أوساط مجتمع علم الفيزياء. غير أنَّ الغالبية العظمى من الفلاسفة متشكِّكون بشأنها؛ نظرًا للمشكلات التي ينطوي عليها مذهب الذرائعية، والتي تناولناها في الفصل الأول؛ إذ إنه يقوم على الفصل بين الجزء «الرصدي» من النظرية (الذي تقدِّم فيه النظرية بالفعل مزاعمَ ذات مغزًى) والجزء «النظري» (وهو ليس سوى أداة تساعدنا في تحليل الجزء الرصدي)، وذلك الفصل لا يتطابق مع الفيزياء على حدِّ فهمنا لها.

في السياق المحدَّد لميكانيكا الكم، تتمثَّل المشكلة في أن أجهزة القياس الكمي ليست صناديقَ سوداء، بعثرَتها في ربوع الصحراء كائناتٌ فضائية خيِّرة أو آلهة. وإنما هي أجهزةٌ ماديةٌ معقَّدةٌ صُمِّمَت كي تتفاعلَ بطرقٍ معقَّدة، وهي نفسها تعتمد على مبادئ ميكانيكا الكم. ونحن لا نستطيع فَهْم ماهية جهاز القياس ولا ما يقيسه، أو حتى ما إذا كان يقيس أي شيء على الإطلاق، ما لم نفهم كيفيةَ عمله؛ وفي هذه الحالة، فإننا بحاجة إلى طريقةٍ لفَهْم ميكانيكا الكم؛ كي نتمكَّن من ذلك، وينبغي ألَّا تستلزم «طريقة الفهم» تلك معرفتنا بماهية أجهزة القياس؛ لأنَّ ذلك سيكون استدلالًا دائريًّا.

إضافة إلى ذلك، فإن العديد من تطبيقاتنا لنظرية الكم لا يتناسب تمامًا مع سياق المختبر ومع قياس الحالة (على الرغم من أن هذا منبثق من الاعتراض نفسه). يتعلَّق العديد من انتصارات نظرية الكم بتفسيراتها للخصائص العيانية للمادة — مثل السبب في توصيل المعادن للحرارة، والسبب في أنَّ الذهب يبدو بلونه الذي يبدو به، وكيفية تصرُّف البلورات عند تسخينها — وتلك تفسيرات لا يمكن تحليلها بسهولة عَبْر تنبؤات قياس منفصلة. ولمثالٍ أكثرَ دراماتيكية، لِنتناول التقلبات الكمية في بداية نشأة الكون التي أدَّت إلى توزيع المادة على أكبر النطاقات؛ إنَّ النظريات المتعلقة بهذه التقلبات قابلةٌ للاختبار، لكن ذلك باعتبارها جزءًا من إطار نظري ومعقَّد لعلم الكونيات فحسب؛ ومن ثمَّ لا توجد طريقة بسيطة للحِجَاج بأن عمليات رصد توزيع المجرات ليست سوى «قياسٍ» للحالة الكمية للكون في بداية نشأته.

إنَّ هذه الاعتراضات بعيدةٌ كل البعد عن أن تكون قاطعة؛ ونظرًا إلى أن الذرائعية كانت هي التوجُّهَ المهيمن في فلسفة العلوم قبل أقلَّ من قرن من الزمان، فستكون عجرفة من الفلاسفة إذا كانوا واثقين تمامًا من ضرورة استبعاد النُّهج الذرائعية لميكانيكا الكم.

ولكنهم على الأقل يعطوننا أسبابًا قوية لدراسة النهج البديل؛ ألا وهو قبول الحالة الكمية باعتبارها وصفًا للخصائص الفيزيائية الخاصة بالنظام، والتوفيق بينها وبين مسألة القياس ومفارقة قطة شرودنجر.

هل نغيِّر الفيزياء؟

ثمَّة طريقة بديلة ومباشرة للغاية (من الناحية المفاهيمية) للتعامل مع مفارقات الكم: بإمكاننا أن نقرِّر أنها ليست مجرَّد مفارقات، بل «تناقضات» وبراهين أن نظرية الكم «خاطئة». فأي نظرية تتنبأ بأن القطط حيةٌ وميتة في الوقت نفسه — في حين أن الظاهر يناقض ذلك — يمكن القول عنها إنها نظريةٌ قد دَحضت نفسها: ربما لا تكمُن المشكلة في فَهْم ميكانيكا الكم، بل في طريقة تعديلها — أو تبديلها — حتى لا تصبح في حالة تناقض صريح مع الحقائق. ونظرًا للنجاح الباهر الذي حقَّقته النظرية، فلا بد من مراعاة العناية البالغة عند إجراء أيٍّ من مثل هذه التعديلات للحفاظ على النجاحات السابقة، لكن قول ذلك أسهلُ من تنفيذه.

يوجد عددٌ كبير من الاستراتيجيات المقترحة لكيفية تعديل ميكانيكا الكم، لكني سأركِّز هنا على مثالَين بارزَين وهما «الانهيار الديناميكي» و«المتغيِّرات الخفية». سنبدأ في المثال الأول من حالة قطة شرودنجر، والتي يمكن كتابتها (بعد التعميم بعض الشيء لمراعاة السَّعات المتغيرة) بالصيغة التالية:

$$|\text{CAT STATE}> = a|\text{ALIVE}> + b|\text{DEAD}>$$

بما أن هذه الحالة (كما يُزعم) ليست هي الحالة التي نجد عليها القطة حين ننظر إليها، فينبغي تعديل النظريةِ كي لا تظهرَ هذه الحالات، أو لا تستمر على أي حالٍ عند رصدها. يؤدي هذا إلى تغيير معادلات ميكانيكا الكم لتضم تطورًا جديدًا يمكن كتابته بالصيغة التالية:

$$|\text{CAT STATE}> \longrightarrow |\text{ALIVE}> \ \left(\text{with probability } |a|^2\right)$$

$$|\text{CAT STATE}> \longrightarrow |\text{DEAD}> \ \left(\text{with probability } |b|^2\right)$$

إذا حدَث هذا الانتقال دومًا بحلول الوقت الذي نرصد فيه القطةَ بالفعل، فإنه يحلُّ مسألة القياس — إذ إننا نجد القطة إما حية أو ميتة (وليست في حالة تراكُب غريبة

تجمع بين الحالتَين)، واحتمالية كلٍّ منهما تتطابق مع ما تتنبأ به قاعدة بورن. يمكن أن نطلق على هذه العملية اسم «انهيار الحالة الكمية» (ومن المصطلحات الأخرى التي تُطلق عليها أيضًا: «انهيار الدالة الموجية» و«انهيار متَّجه الحالة»، وهي مصطلحات تمثِّل أساليبَ رياضيةً مختلِفة متَّبعة في التفكير بشأن الحالة الكمية).

طُرحت فكرة انهيار الحالة الكمية في بداية نشأة نظرية الكم، وقد اقترح بول ديراك، وهو أحدُ مؤسِّسي النظرية أنها تحدُث «تحديدًا» عند قياس النظام. معنى هذا أنه يوجد صنفان مختلفان من ديناميكا ميكانيكا الكم: الصنف العادي (ويُطلِق عليه علماء الفيزياء «الصنف الوحدوي») وينطبق حين لا يكون النظام قيدَ القياس؛ أما الصنف الآخر فهو قاعدة الانهيار التي تحدُث عند إجراء القياس. إذا اعتمدنا القراءةَ الاحتمالية للحالة الكمية (حيث لا تعبِّر حالة قطة شرودنجر إلا عن احتمالية أن تكون القطة حية أو ميتة)، فلن يكون لها أهميةٌ؛ إذ إنها لن تناظر إلا معلوماتنا المحدَّثة حين نكون قد اكتشفنا بالفعل ما إن كانت القطة على قيد الحياة أم لا. على الرغم من ذلك، فلا يجدُر بنا التفكير فيها بهذه الطريقة بما أنها تعديل على نظرية الكم لحل مسألة القياس؛ وإنما ينبغي التفكير فيها على أنها تغيير فوري وعشوائي للحالة التي تكون عليها القطة، حيث تتحول من الحالة غير المؤكدة لعدم موتها إلى حالةٍ أشهر وهي إما أنها حية أو ميتة، لكنها مؤكَّدة على أي حال. (وبناءً على هذا، إذا استخدمنا انهيار الحالة الكمية لحل مسألة القياس، فإننا نفعل ذلك باعتباره جزءًا من تفسير «مادي» للحالة الكمية — وبذلك تحدُث الاحتمالات بسبب العشوائية في قاعدة الانهيار — وليس بوصفه جزءًا من تفسير الحالة نفسه.)

لا تزال هذه الطريقة لتقديم ميكانيكا الكم موجودةً في الكتب الدراسية التمهيدية، لكنها لم تَعُد تُستخدم غالبًا في الممارسة الفعلية لميكانيكا الكم. تتمثَّل المشكلة الأساسية لهذه الطريقة في أنها تعامِل «القياس» على أنه مفهوم أولي خام، وقد رأينا في القِسم السابق أن هذه الفكرة تتعارض مع رغبة علماء الفيزياء في معاملة القياسات على أنها عملياتٌ فيزيائية، يمكن دراستها باستخدام أدواتِ نظريةِ الكم نفسِها. وفي ضوءِ ما تناولناه في الفصل الرابع، فثمَّة طريقة أخرى لتبيان المسألة، وهي أن النظرية التي يكون أحد مبادئها الجوهرية أنَّ «القياس يؤدي إلى انهيار الحالة الكمية» هي نظرية يُستبعد فيها أيُّ تحليل اختزالي للقياس باستخدام مصطلحاتٍ أبسط؛ ومع ذلك، يبدو أن علماء الفيزياء يقومون بمثل هذه التحليلات طوال الوقت، بل يعتمدون عليها في واقع الأمر في بناء الأجهزة المعقَّدة التي تُستخدم بالفعل في مختبرات الفيزياء.

على الرغم من ذلك، فثمَّة طريقة بديلة للتعبير عن انهيار الحالة الكمية: بدلًا من إدراج الطرح الجوهري المتمثل في حدوث الانهيار عند القياس، يمكننا تخيُّل نظرية أخرى يحدُث فيها الانهيار لسبب آخر وفي ظروف أخرى، ويمكن تحديدُ هذا السبب ووصفه بدقة في سياق الفيزياء المجهرية، لكن تلك الظروف تضمن في الحقيقة حدوثَ الانهيار قبل اكتمال القياسات الفعلية. تُعرف النظريات من هذا النوع باسم «نظريات الانهيار الديناميكي»؛ حيث تشير لفظة «الديناميكي» إلى آليةٍ ديناميكية حقيقية ومحدَّدة مجهريًّا، بدلًا من التعامل مع الانهيار بوصفه ظاهرةً تنتج عن المفهوم العياني: «القياس».

إنَّ القيود التي تُفرض على أي نظرية من هذا القبيل صارمة. إذا حدث الانهيار بسرعة أكبرَ من اللازم، فسيمنع تأثيرات التداخل التي تعتمد عليها نظريةُ الكم في تنبؤاتها وتفسيراتها، ومن ثَم ستدحض نفسها. وإذا تأخَّر حدوثه أطولَ من اللازم، فلن يفيَ بمهمته في كبح حالات قطة شرودنجر. على الرغم من ذلك، فقد صيغ بعضٌ من مثل هذه النظريات، وإن كان ذلك في النُّسخ البسيطة من ميكانيكا الكم على الأقل. تطرح هذه النظريات تنبؤات تحيدُ عن تنبؤات ميكانيكا الكم «العادية» (حيث إنها تتنبأ بأنَّ التداخل لا يحدُث في ظروف غريبة معيَّنة، لكنها قابلة للاختبار من حيث المبدأ)؛ وصحيحٌ أنَّ التجارب لم تكشف حتى الآن عن أي انحرافاتٍ من هذا القبيل، لكن إجراء مثل هذه التجارب صعبٌ للغاية، ولا يمكننا أن نستبعدَ حدوثَ مثل هذا التقدُّم في المستقبل.

تبدأ الاستراتيجية الثانية لتعديلِ نظريةِ الكم بالطبيعة المزدوجة الواضحة للحالة الكمية، سواء أكانت مادية أم احتمالية. تفسِّر الاستراتيجية هذه الطبيعةَ المزدوجة تفسيرًا منطقيًّا من خلال تزويد نظرية الكم بـ «متغيرات خفية» إضافية، وظيفتُها في النظرية هي وصفُ النتائج الفعلية للقياس: في حالةِ قطة شرودنجر على سبيل المثال، تظل الحالةُ الكمية غيرَ محدَّدة لكن لا تعود تتخذُ مهمةَ التعبير عن العالَم العياني المرصود. فتلك المهمة تقع على عاتقِ المتغيرات الخفية، التي تمثِّل حالةَ القطة بأنها إما حية أو ميتة، ولكن إلى أن نعرفَ القيم الخاصة بهذه المتغيرات، فقد تكون القطة حية أو ميتة. وفي هذه النظريات التي تستخدم «المتغيرات الخفية»، تدخل الاحتمالية في النظرية بالطريقة (المثيرة للجدل!) نفسها التي تدخل بها في الميكانيكا الإحصائية، وبهذا فإنَّ الجوانبَ الاحتمالية لنظرية الكم تنتقل من الحالةِ الكمية إلى المتغيرات الخفية.

صِيغَت بعضُ النظريات التي تُقدِّم عامل المتغيرات الخفية، وأؤكد مجددًا على أنها للنُّسخ البسيطة من ميكانيكا الكم (ومن أشهرها «نظرية دي بروي-بوم»، ويُطلَق عليها

في بعض الأحيان «نظرية الموجة الدليلية» أو «ميكانيكا بوم» نسبةً إلى عالِمَي الفيزياء لوي دي بروي وديفيد بوم). تحظى هذه النظريات برواجٍ بين الفلاسفة؛ أما علماء الفيزياء الذين يميلون إلى تعديل ميكانيكا الكم، فغالبًا ما يفضِّلون نظرياتِ الانهيار الديناميكي، وأظن أن السببَ في ذلك هو أن نظريات المتغيرات الخفية لا تطرح في المعتاد تنبؤاتٍ تتعارض مع ميكانيكا الكم التقليدية؛ ولهذا (وفقًا للكثير من علماء الفيزياء) فإن المتغيرات الخفية تزيد من تعقيد النظرية من دون أيِّ مردودٍ تجريبي. ويردُّ أنصار النظرية بأن المردود يتمثَّل في وجود نظريةٍ مفهومةٍ في الأساس.

(ثمَّة مشكلةٌ أخرى بشأن نظريات المتغيرات الخفية، وهي مشكلة فلسفية بشكلٍ كبير. تتمثَّل المشكلة في أنَّ هذه المتغيرات تعتمد — أو تُمثَّل في المعتاد على الأقل — على افتراض أن القياسات العيانية تكشف عن المتغيرات الخفية في واقع الأمر، لا عن خصائصِ الحالة الكمية. (على سبيل المثال، لا بد للقياسات الخاصة بالقطة أن تكشف عن المتغيرات الخفية التي تمثِّل «القطة حية» أو «القطة ميتة»، وليس عن الحالة الكمية التي ستمثِّل قطةً حية وميتة في الوقت نفسه، إن هي مثَّلت أيَّ شيء مفهوم). وفي أشهر التنويعات التي نُوقشَت من نظريات المتغيرات الخفية، فإن هذا يُعَد افتراضًا أساسيًّا للنظرية، وليس شيئًا يمكن اشتقاقه ديناميكيًّا من أي تحليلٍ لعمليات قياسٍ متاحةٍ ضمن النظرية. ويبدو مرةً أخرى أن هذه العملية تتطلَّب مفهومًا أوليًّا يوضِّح كيفيةَ ارتباط القياس بالفيزياء، وذلك على غرار المفهوم الذي يتطلَّبه مذهب الذرائعية. الحق أنَّ تلك مسألةٌ يحتدُّ فيها الجدال في فلسفة الفيزياء، وتُثير أسئلةً عميقةً إلى حدٍّ ما بشأنِ ما يعنيه تفسير نظرية فيزيائية.)

إنَّ نظريات المتغيرات الخفية والانهيار الديناميكي تطرح ألغازًا فلسفية مثيرة للاهتمام، لكن المشكلة الأساسية في أيٍّ منهما هي النجاحات الضخمة التي حقَّقتها نظريةُ الكم. وحتى الآن، لم ينجح أيٌّ من فئتي النظريات — ولا أيُّ نهجٍ يعتمد على تعديل نظرية الكم — في إعادةِ إنتاج تنبؤات نظرية الكم خارج مجموعةٍ صغيرةٍ نسبيًّا من التطبيقات، وتنحصر هذه التطبيقات تقريبًا فيما يتعلَّق بفيزياء المادة التي تتحرَّك بسرعاتٍ غير نسبيةٍ في المواقف التي يمكن تجاهل الضوء فيها. فعلى سبيل المثال، لا توجد استراتيجيةُ تعديلٍ في الوقت الحاضر بإمكانها أن تعيد إنتاج تجربة الشِّق المزدوج (التي تستخدم فوتونات الضوء)، أو أن تشرح آليةَ عمل الليزر، فضلًا عن أن تُمكِّننا من فَهْم فيزياء الجُسَيمات الحديثة. على الرغم من ذلك فقد شهدَت هذه المسألة إحرازَ بعض التقدُّم (وإن كان مقداره الدقيق محلَّ جدال، وأنا نفسي لم أزل متشككًا إلى حدٍّ كبير بشأن هذه المسألة)، لكن على

أي حال، فإنَّ أنصار تعديل نظرية الكم لحل مشكلة القياس عاكفون على مشروعٍ ضخمٍ حقًّا لإعادة التأسيس؛ يعيدون فيه بناءَ فيزياء القرن العشرين على أساسٍ جديد.

عوالمُ متعدِّدة

يمكن أن يُطلق على النُّهج الواردة في القِسم السابق اسم نُهج «تغيير الفيزياء»؛ تتبنَّى هذه النُّهج درجةً أساسية من الواقعية العلمية، باعتبارها الطريقَ لفَهْم النظريات الفيزيائية، وهي تحكُم على النظرية الكمية طبقًا لهذا المعيار، وتجد أنها بحاجةٍ إلى التحسين؛ ويتمثَّل الحل الذي تقترحه هذه النُّهج في تغيير نظرية الكم نفسِها. وعلى النقيض من ذلك، فإن النُّهج التي تعتمد في فَهْم ميكانيكا الكم على الاحتمالات، هي في معظمِها من نُهُج «تغيير الفلسفة»؛ أي إنها تترك الصياغةَ الصورية لنظرية الكم من دون تعديل، ولكنها تعتمد نهجًا مختلفًا (قائمًا على الذرائعية إلى حدٍّ ما في المعتاد) لفَهْم النظريات الفيزيائية.

إنَّ كلًّا من فكرتَي تغيير الفيزياء وتغيير الفلسفة فكرةٌ وجيهة. فمفارقات نظرية الكم تخبرنا بأنَّ ثمة «خطأً» ما؛ وتبدو الفيزياء وفلسفة العلم مجالَين منطقيَّين للبحث عن ذلك الخطأ. وقد يبدو بالطبع أنه يوجد تقسيمٌ طبيعي لهذا الجهد؛ فالمهمة الأنسبُ للفلاسفة هي أن يُعيدوا تقييمَ البدائل المتاحة للواقعية العلمية في مواجهةِ المفارقة الكمية، والمهمة الأنسب لعلماء الفيزياء هي استكشاف نظرياتٍ فيزيائيةٍ بديلة.

غير أنَّ الأمور لا تسيرُ على هذا النحوِ في الحقيقة. فقلةٌ قليلة من الفلاسفة (توجد استثناءات بالطبع) هم مَن يرون حقًّا أن حلَّ مشكلة القياس يتطلَّب منَّا تغيير فلسفة العلوم، وعلى الجانب الآخر، فكثيرًا ما يستنتج الفلاسفة الذين يتناولون هذه القضايا أنها تعكس قصورًا في الفيزياء. وقلةٌ قليلة من علماء الفيزياء (توجد استثناءات أيضًا) هم مَن يرَوْن حقًّا أن حلَّ مشكلة القياس يتطلَّب منَّا تعديلَ ميكانيكا الكم نفسها؛ وعلى الجانب الآخر، فكثيرًا ما يستنتج علماء الفيزياء الذين يُعالجون هذه القضايا أنها تستلزم فلسفةَ علوم جديدة أكثرَ ابتكارًا. التفسير الواضح لذلك أن الفلاسفة حساسون تجاه مدى صعوبة استراتيجية تغيير الفلسفة، ولكنهم راضون عن صعوباتِ استراتيجيةِ تغيير الفيزياء؛ والعكس بالعكس.

على الرغم من ذلك، لما بدا أنَّ الجمع بين الواقعية العلمية وميكانيكا الكم غيرِ المعدَّلة يقودنا إلى مفارقةِ قطة شرودنجر، فربما لا يكون لدينا ثمَّة خيار سوى تعديل فلسفة

العلوم، أو صياغة ميكانيكا الكم، مع ما قد يكون في ذلك من صعوبة. لكنَّ الأمر ليس كذلك في الحقيقة؛ إذ يوجد خيارٌ ثالث. كان مَن توصَّل إلى الفكرة الأساسية لهذا الخيار هو عالِم الفيزياء هيو إيفريت في عام ١٩٥٧؛ ومن ثمَّ فقد سُميت ب «تفسير إيفريت». ولنتعرَّف على هذا التفسير، سنتخيَّل قطة شرودنجر مرةً أخرى، ونسأل كيف نعرف أنَّه لا يمكن للنظام، رغم كل شيء، أن يجمع بين حالتَي حياة القطة وموتها في آنٍ واحد. الإجابة الواضحة أننا لا نرى قططًا في هذه الحالات أبدًا، لكن «الرؤية» عمليةٌ فيزيائية؛ ومن ثمَّ فنحن نحتاج إلى نمذجتها فيزيائيًّا في سياق ميكانيكا الكم، كي نُحدِّد ما يحدُث بالفعل حين يتفاعل الراصدون — من أمثالي — مع قطة شرودنجر.

فيما يلي طريقةٌ بسيطة لذلك. لا بد أن يكون لديَّ على الأقل ثلاث حالات مميَّزة لكنها وثيقة الصلة؛ وهي: |IGNORANT> (الحالة التي أكون عليها قبل رؤية القطة)؛ |SEES ALIVE> (الحالة التي أدخل فيها عند رؤية قطة حية)؛ |SEES DEAD> (الحالة التي أدخل فيها عند رؤية قطة ميتة). لِنفترض أنني أنظر إلى قطة حية بالتأكيد؛ قبل الرصد، ستكون الحالة المشتركة للقطة ولي هي |ALIVE; IGNORANT>، وستتطوَّر هذه الحالة إلى |ALIVE; SEES ALIVE>:

ALIVE; IGNORANT> → |ALIVE; SEES ALIVE>

وبالمِثل، إذا كانت القطة ميتة بالتأكيد، فلا بد أن تصيرَ عمليةُ الرصد على النحو التالي:

|DEAD; IGNORANT> → |DEAD; SEES DEAD>

والآن، لِنفترض أن القطة تبدأ في حالة قطة شرودنجر،

|CAT STATE> = a|ALIVE> + b|DEAD>

قد نتوقَّع بحَدْسنا أن تصيرَ عملية الرصد لهذا النظام على النحو التالي:

|CAT STATE; IGNORANT> →

|CAT STATE; SEES WEIRD INDEFINITE CAT>

غير أنَّ الحَدْس في الفيزياء دليلٌ سيئ، وما تخبرنا به الفيزياء في الحقيقة (بصفتها نتيجة تلقائية لكيفية سير عمليات رصد القطتَين الحية بالتأكيد والميتة بالتأكيد) أنه يمكن إعادةُ كتابة الحالة |CAT STATE; IGNORANT> بالصورة التالية:

|CAT STATE; IGNORANT> =

a|ALIVE; IGNORANT> + b|DEAD; IGNORANT>

ومن ثمَّ فإنها تتطوَّر على النحو التالي:

|CAT STATE; IGNORANT> ⟶

a|ALIVE; SEES ALIVE> + b|DEAD; SEES DEAD>

طبقًا لميكانيكا الكم، فأنا لا أتطوَّر إلى حالة الرؤية الأكيدة لقطةٍ غيرِ محدَّدة، بل أتطور إلى حالةٍ غير محدَّدة خاصة بي، وهي حالةٌ تمثِّل نتيجتَي قياس عاديتَين ومحدَّدتَين في آنٍ واحد.

وهكذا تستمر الأمور في السير على هذا المنوال. إذا سألتني إن كانت القطة حيةً أم لا، فستنتهي إلى حالتَين في آنٍ واحد: حالة تسمعني أقول فيها «نعم»، وحالة تسمعني فيها أقول «لا». وبالفعل، فإن الحالة المجمعة منَّا جميعًا — أنت وأنا والقطة — عبارة عن حالتَين في آنٍ واحد، لكن كلتا الحالتَين الفرديتَين عادية: الحالة التي نتوصَّل فيها إلى أن القطة حية، والحالة التي نتوصَّل فيها إلى أن القطة ميتة. وإذا سأل شخصٌ ثالث، أو إذا نشرتَ حالة القطة على فيسبوك، فستنطبق فكرة الحالتَين الآنيتَين على المزيد والمزيد من الأنظمة؛ بمعنى أنها ستتداخل معنا.

في واقع الأمر، عند تجاوُز مقياس معيَّن — مقياس أصغر بكثير من القطة البائسة، سيكون التفاعل بين نظام وآخرَ حتميًّا حتى إن لم يكن هناك «رؤية» مقصودة. فالتأثير الجذبوي للقطة على الهواء من حولي أو الجزيئات في جسمي يؤدي إلى تشابكي وتشابكك وتشابك البيئة المحيطة تشابكًا فعَّالًا مع القطة، سواءٌ أحاولنا معرفة حالتها أم لا. حاول أن تجعل شيئًا بحجم القطة يتَّخذ حالةَ شيئَين في آنٍ واحد، وسرعان ما ستجد أن الكوكب بأكمله، بل المجموعة الشمسية بأكملها تتَّخذ حالةَ شيئَين في آنٍ واحد.

لكن ما هما هذان الشيئان؟ كلٌّ منهما عادي للغاية: فكلتاهما حالتان طبيعيتان للأرض، والفَرْق الوحيد بينهما هو ما إذا كانت القطة البائسة حيةً أم ميتة. وتتطوَّر كلُّ حالةٍ منهما زمنيًّا طبقًا للقواعد العادية التي تحكم الحالات المعتادة للأرض. معنى هذا أنَّ حالة الأرض تتكوَّن من فرعَين متوازيَين وهما: فرع «القطة حية» وفرع «القطة ميتة»، وكلُّ حالةٍ منهما تتطوَّر بمرور الوقت دونما رجوع إلى الحالة الأخرى.

توجد كلمةٌ جيدة تصف جزءًا من الواقع يشبه الأرضَ العادية، ويتطوَّر دونما رجوع إلى أجزاءٍ أخرى من الواقع؛ ألا وهي كلمة «عالَم». ولا تعني الكلمةُ في هذا السياق كونًا كاملًا قائمًا بذاتِه، بل بمعنى أن الأرض أو المريخ عبارة عن عالَم؛ فهما جزءان من الواقع يتفاعلان بقوةٍ مع ذاتهما لكن نادرًا ما يتأثَّران بعضهما ببعض.

ليست التجارب على القطط هي المكانَ الوحيد بالطبع الذي تتضخَّم فيه تأثيراتُ نظرية الكم، لتصل إلى كائناتٍ بحجم البشر. فنحن نعيش في عالَمٍ حيث التغييرات الصغيرة على المستوى المجهري يمكن — بمرور الوقت — أن تصل إلى نطاق الحياة اليومية. فإلكترونات الضوء الفلوري توجد «هنا» و«هناك»، والشعاع الكوني يصطدم بسلسلة الحمض النووي في الخلية ولا يصطدم بها ... وسرعان ما يومض الضوءُ ولا يومض، والخلية تتحوَّر ولا تتحوَّر. يبدو إذن أن هذا الانقسام إلى عوالمَ متوازيةٍ أمرٌ شائع، ويحدُث مراتٍ لا تُحصى في الثانية، في جميع أنحاء الأرض.

كل هذا يقودنا إلى استنتاجٍ مُفاده أننا إذا تعاملنا مع ميكانيكا الكم بحِرْفية وواقعية، فسيكون العالَم الذي نعيش فيه واحدًا من عوالمَ متعدِّدةٍ لا حصرَ لها — أحد العوالم المتعدِّدة المنبثقة — وكلُّها موجودة بالتوازي مع بعضها، وكلٌّ منها ينبثِق من العوالم الأخرى على نحوٍ مطرد. ومن هنا يأتي الاسم الأشهر لتفسير إيفريت لميكانيكا الكم وهو «تفسير العوالم المتعدِّدة».

من بين كل التفسيرات التي تناولناها، يُعَد تفسير إيفريت هو الأغربَ من عدةِ أوجه. على الرغم من ذلك، فهو الأكثر تحفظًا إلى حدٍّ بعيد من جوانبَ أخرى؛ فهو لا يتطلب تعديلَ الجانب الصوري الذي حقَّق نجاحًا كبيرًا في ميكانيكا الكم، ولا يتطلب إعادةَ نظرٍ جذرية في المشروع العلمي. إن تنبؤه المذهل بتفرُّع الواقع هو نتيجة لهذا الجانب الصوري الكمي نفسه، وليس افتراضًا زائدًا عليه.

إنَّ أقلَّ ما يمكن أن يُقال عن مدى صلاحيةِ تفسير إيفريت إنه مسألةٌ مثيرة للجدل. الاعتراض الأوضح والأشهر هو عدم التصديق المحض، لكن هذا ليس «اعتراضًا»، بقَدْر

ما هو تعبير عن الدهشة. فعادةً ما يركِّز النقَّاد الجادُّون لتفسير إيفريت على مشكلتَين محدَّدتَين. المشكلة الأولى: هل الجانب الصوري في نظرية الكم يشير إلى وجود عوالمَ متوازيةٍ حقًّا، أم هو مجرد ألفاظ برَّاقة وليس لها أهمية فيزيائية؟ والمشكلة الثانية: كيف نتوصَّل إلى الاحتمالات في النظرية؟

يكمُن مفتاح حلِّ المشكلة الأولى (وتسمَّى أحيانًا — لأسباب لا يتَّسع المقام لسردها — «مسألة الانحياز المفضَّل») في ملاحظة أن ديناميكا الكم للأنظمة الكبيرة المعقَّدة سرعان ما تخفي تأثيرات التداخل التي تحدِّد السِّمات الكمية المميزة لميكانيكا الكم. فحينما يحتوي النظام الكمي على العديد من الأجزاء المتحركة — أي درجات كبيرة للغاية من الحرية كما يقول علماء الفيزياء — تتشابك درجاتُ الحرية تلك بعضها مع بعض بوجهٍ عام؛ ومن ثَم يصبح تأثير التداخل غيرَ ملحوظ.

لنفترِض على سبيل المثال أننا نحاول توضيحَ التداخل بكرةِ بولينج بدلًا من الفوتون. للقيام بذلك، علينا أن نجهِّز الكرةَ بحيث تصبح في حالةٍ غير محدَّدة: حالة من التراكب لموضعَين مختلفَين؛ أي ربما يمكن صياغتها تخطيطيًّا على النحو التالي:

$$|BALL\rangle = a|HERE\rangle + b|THERE\rangle$$

لكنَّ جزيئات الهواء والفوتونات المارَّة وغيرها ترتدُّ عن كرة البولينج في الحالة $|HERE\rangle$ بطريقة مختلفة عن ارتدادها عن الكرة في الحالة $|THERE\rangle$. ومن ثَم فإن الحالة $|BALL\rangle$ غير مستقرة؛ فهي سرعان ما تتشابك مع ملايين الجسيمات الأخرى، فينتهي الأمر بكرة البولينج وبيئتها إلى حالةٍ على غرار:

$$|ENTANGLED\ BALL\rangle =$$

$$a|HERE;\ many\ particles\ record\ HERE\rangle +$$

$$b|THERE;\ many\ particles\ record\ THERE\rangle$$

لكي يمكن لتجربة — أو عملية ديناميكية طبيعية — أن تكشفَ عن التداخل بين الحدَّين في هذا التراكب، لا يكفي أن تؤثِّر ديناميكا هذه التجربة في كرة البولينج وحدَها، بل ينبغي أن تؤثِّر في كلٍّ من الكرة وبيئتها، وأن تغيِّر منهما بالطريقة الصحيحة تمامًا بحيث تُظهِر تأثيرَ التداخل. وهذا مستحيلٌ عمليًّا.

يُطلَق على عملية التشابك المستمر مع البيئة اسمُ «انعدام الاتساق». تُعَد هذه العملية صورةً من صور الديناميكا الكلية غير الانعكاسية التي تناولناها في الفصل الرابع، وهي تنطوي على ألغازٍ فلسفية خاصة بها، لكنها تطرح تفسيرًا ديناميكيًّا لإمكانية تجاهُل تأثيرات التداخل حينما يكون النظام معقدًا للغاية، والسبب في أنه يمكن في هذه الحالة وصفُ النظام وصفًا محكمًا على أنه عبارة عن نظامَين (أو أكثر) منفصلَين يتطوَّران بشكلٍ متوازٍ، بدلًا من نظامٍ واحد يشتمل على أجزاءٍ متداخلة. وحينما قلت — فيما سبق — إن كل حالةٍ من الحالتَين: «القطة حية» و«القطة ميتة» تطوَّرت بمرور الوقت «دونما رجوع إلى الحالة الأخرى»، كانت عملية انعدام الاتساق في الخلفية؛ فهي العملية الفيزيائية التي تطوِّر بها الأنظمةُ الكمية بنيتَها المتفرعة المنبثقة، لكنها موضوعية رغم ذلك.

(يمكن أيضًا فَهْم انعدام الاتساق بصفته توضيحًا للسبب في أن الأمر ينجح «فعليًّا» عند معاملةِ الحالات الكمية للأنظمة المعقَّدة، باعتبارها توزيعاتٍ للاحتمالات على حقائقَ أساسية ومحدَّدة، على الرغم من أن التداخل يعني عدمَ إمكانية بقاء هذا التفسير؛ ففور بَدْء انعدام الاتساق تصبح تأثيراتُ التداخل غيرَ قابلةٍ للكشف عنها؛ ومن ثَم يمكن تجاهلها. لهذا السبب، من الشائع — بين علماء الفيزياء على الأقل — القول إن انعدام الاتساق «في حدِّ ذاته» يحلُّ مسألةَ القياس من دون الحاجة إلى أكوانٍ موازية. على الرغم من ذلك، فلكي يكون هذا الحل قابلًا للتطبيق، لا نزال بحاجةٍ إلى تغييرِ تفسيرنا لماهية الحالة الكمية من فيزيائيةٍ إلى احتمالية، وانعدام الاتساق وحدَه لا يسمح بذلك. وعلى الجانب العملي، عادةً ما تُؤدِّي محاولات استخدام انعدام الاتساق لحلِّ مسألة القياس إلى تنويعاتٍ من تفسير إيفريت، وإن كان ذلك لا يزال موضعَ جدالٍ شديد.)

بالنسبة إلى المشكلة الثانية — «مشكلة الاحتمالية» — فهي أصعب في حلها. بعد تجربة قطة شرودنجر، وبعد انعدام الاتساق، يمكن التعبير عن حالة العالم على النحو التالي:

$$a|\text{LIVE CAT BRANCH}\rangle + b|\text{DEAD CAT BRANCH}\rangle$$

ولكن لربطِ النظرية بالتجربة، لا بد من تفسيرِ السَّعَتَين التربيعيتَين $|a|^2$ و$|b|^2$ على أنهما احتمالان، غير أنَّ المسوِّغ لهذا لا يتضح على الفور. فعلى الرغم من كل شيء، عادةً ما تدخل الاحتمالية إلى الفيزياء إما من خلال حالاتٍ مجهرية غير معروفة أو من

خلال قوانين احتمالية في جوهرها؛ لكننا لا نجهل الحالاتِ المجهرية الوثيقة الصلة في تفسير إيفريت، ولا تتضمَّن ديناميكياتها احتمالاتٍ جوهرية. (ولا يمكننا أن نعدَّ السَّعاتِ التربيعيةَ وصفًا لعدد النُّسخ الموجودة من كل فرع، إلا إن كان ذلك على سبيل المجاز.)

إنَّ حل مسألة الانحياز المفضَّل يستلزم التفاعل مع الرياضيات التفصيلية والفيزياء الخاصَّة بنظرية انعدام الترابط، أما مسألة الاحتمالية فهي فلسفيةٌ بدرجةٍ أكبر. وتنطوي السَّعات التربيعية على الخصائص الصورية الصحيحة التي تجعلها احتمالية (فهي تتَّبع مسلَّماتِ التفاضل والتكامل الخاصة بالاحتمالية؛ ويضمن انعدام الاتساق أنها ستتصرف كما لو كانت احتمالاتٍ «جوهرية»)، لكن السؤال الذي يبقى أمامنا الآن هو: هل هي احتمالاتٌ حقيقية؟ اقتُرح العديد من الاستراتيجيات للإجابة عن هذا السؤال، وتحاول الاستراتيجيات الأكثر تطورًا من بينها (على غرارِ ما وضعه عالِم الفيزياء ديفيد دويتش، وفلاسفة أمثال هيلاري جريفز، وواين ميرفولد وأنا)، أن تستكشفَ ماهية الطريقة العلمية التي يمكن أن يتَّبعها العلماء ممن يأخذون تفسيرَ إيفريت على محملِ الجِدِّ، وأن تستعيد النتيجة التي تفيد بأن هؤلاء العلماء سوف يعاملون السَّعات التربيعية كما لو كانت احتمالات. ولا يزال الجدال مستمرًّا بشأنِ إن كانت هذه الاستراتيجيات ستنجح أم لا.

ثمَّة نقطةٌ أخرى أكثرُ جوهرية ينبغي توضيحها هنا؛ وهي أنَّ الاحتمالية غامضة في الفيزياء حتى خارج سياق تفسير إيفريت. لقد رأينا بالفعل مدى صعوبةِ فَهْم احتمالات الميكانيكا الإحصائية. وليسَت احتمالاتُ الديناميكا الاحتمالية التي يُفترَض أنها «جوهرية» أقلَّ غموضًا. إننا نعرف كيف نستخدم مفهومَ الاحتمالية (تقريبًا: اختبار النظريات الاحتمالية عن طريق قياس التواتر النسبي، واختيار الإجراءات التي تزيد من أرجحية النتائج المطلوبة)، لكن فيما دون ذلك، لا يوجد تفسيرٌ متَّفق عليه للاحتمالية. نعرف أنَّ هذا لا بد أن يكون منطقيًّا إلى حدٍّ ما؛ نظرًا للدور الذي تؤديه الاحتمالية في العلوم، ولكن إذا كان تفسير إيفريت صحيحًا، فإن ذلك الدور لا تؤديه الاحتمالات الجوهرية، بل سعات تربيعية لفروع منعدمة الاتساق هي التي تؤدي هذا الدورَ منذ الأزل. إننا بحاجةٍ إلى تحاشي تبنِّي معيار مزدوج هنا: إذا كانت الاحتمالية الفيزيائية غامضةً بوجهٍ عام، فإن غموضها في نظريةٍ معينةٍ ليس حجَّةً ضد هذه النظرية على وجه الخصوص. وفي هذه الحالة (وفي حالاتٍ أخرى كثيرة)، فإن الشرح الغريب لتفسير إيفريت يزيد من وضوح الألغاز الفلسفية القائمة.

إعادة النظر في اللامحلية

لقد قدَّمت في الفصل الخامس «متباينة بيل»، وهي قيدٌ على علاقات الارتباط بين أزواج القياسات المتباعدة (أو يمكن القول إنها قيدٌ على أعلى درجة يمكن الحصول عليها في أي لعبة، بناءً على علاقات الارتباط، كما أوضحت في المثال)، وذلك وفقًا لافتراضِ أن هذه «الأزواج المتباعدة» لم تكن على اتصالٍ مباشر، وهو قيد يُنتهك تجريبيًّا أيضًا؛ ومن ثمَّ يبدو أنه ينطوي على تفاعلاتٍ أسرعَ من الضوء في أي نظريةٍ فيزيائية ناجحة تجريبيًّا. يمكننا الآن أن نطرح السؤال التالي: ما الدور الذي يؤديه هذا القيدُ في نُهُج ميكانيكا الكم التي تناولناها؟

نجد أوضح الإجابات عن هذا السؤال في نظرياتِ الانهيار الديناميكي ونظريات المتغيِّر الخفي. فكلٌّ من هذه النظريات تنصُّ صراحةً — في جانبها الصوري — على وجود تفاعلات أسرعَ من الضوء، ووجود «تفاعلات آنية» بالطبع، ووجود ظاهرة «الفعل عن بُعد». وفي كلٍّ من هذه الحالات، تكون هذه الظواهر نتيجةً للكيفية التي تنطبِق بها الديناميكا المعدَّلة أو التكميلية للنظريات على الجسيمات المتشابكة. مرةً أخرى تخيَّل جسيمين في حالةٍ أحادية، وافترض أن هذين الجسيمين قد أُبعدا أحدهما عن الآخر. طبقًا لنظرياتِ الانهيار الديناميكي، فإن قياس دوران أحدِ الجسيمين سيؤدي إلى انهيار الحالة المشترَكة بين الجسيمين، مما يؤثِّر من فوره في الجسيم الآخر، حتى وإن كانت بينهما مسافةُ أميال أو حتى سنين ضوئية. وطبقًا لنظريات المتغيِّر الخفي، فإن قياس المتغيِّر الخفي المناظر لدوران أحد الجسيمين سيؤثِّر من فوره في المتغيِّر الخفي المناظر لدوران الجسيم الآخر، وذلك أيضًا بصرفِ النظر عن طول المسافة بينهما. (وفي كلتا الحالتَين، لا يمكن تجنُّب هذا التفاعل الآني إذا كنا نريد إعادةَ إنتاج الفيزياء المرصودة الخاصة بقياسات الجسيمات المتشابكة.)

هذا يعني أن فئتَي النظرية في حالة توتُّر شديد على الأقل مع نظرية النسبية، ويمكننا أن ندرك السببَ في ذلك بمساعدةِ ما أوضحناه في الفصل الثالث. فالقول إن التأثير في الجسيم البعيد آنيٌّ يعني أن القياس له تأثيرٌ في الجسيمين في آنٍ واحد، وقد رأينا أن النسبية لا تسمح بوجود مفهوم مطلَق للتزامن ومستقل عن الإطار المرجعي، وهي تشير بقوة بالطبع إلى أن «التزامن» مفهومٌ اصطلاحي بحت. ويبدو أن الفعل عن بُعد

يتعارض مع هذا، وهو يعيد فَتْح الأسئلة المتعلِّقة ببنية الزمكان التي يبدو أن النسبية قد حلَّتها. (لكنَّ هذا الحكم ليس نهائيًّا تمامًا؛ فثمَّة نماذجُ مبسطةٌ للغاية لنظريات الانهيار الديناميكي التي يبدو أنها تتفادى المشكلة وتظل متوافقةً مع النسبية.)

الحق أنَّ أنصار هذه النُّهج يشكون من أن نقَّادها لا يرون قوةَ الحجج التي تستند إلى متباينة بيل. تخبرنا هذه الحجج — إضافةً إلى الانتهاكات التجريبية لتلك المتباينات — أن «أي» نظرية ملائمة تجريبيًّا ستحتاج إلى تفاعلاتٍ أسرعَ من الضوء؛ ومن ثمَّ فتلك (على حدِّ قولهم) نقطةُ قوةٍ لصالح هذه النُّهُج وليسَت نقطةَ ضعف؛ إذ يرون أنها تُبيِّن على نحوٍ واضحٍ وصريحٍ كيف أنَّ التفاعلات الأسرعَ من الضوء تتلاءم مع الفيزياء.

غير أنَّ الأوان لم يزل سابقًا على ذلك؛ إذ يطرح تفسيرُ إيفريت طريقةً لتفادي مشكلة متباينة بيل. ثمَّة فرضيةٌ خفية في طَرْحي للمتباينة: لقد افترضت أن نتائجَ التجارب فريدة، وهو ما لا ينطبق في حالة تفسير إيفريت. فمن المقبول عمومًا أن حالات خَرْق متباينة بيل للواقع التجريبي لا تفرض اللامحلية على نظرية العوالم المتعدِّدة، وبالفعل فإن الديناميكا غير المعدَّلة لميكانيكا الكم — المستخدَمة في تفسير إيفريت دونما تغيير — لا تنطوي على ظاهرة الفعل عن بُعد؛ ومن ثمَّ فهي لا تتعارض مع النسبية.

ماذا إذن عن النُّهج القائمة على الاحتمالية؟ هنا، تصبح الأمور أكثرَ تعقيدًا. بالنسبة إلى النُّهج «الواقعية» القائمة على الاحتمالية، حيث الاحتمالات لخصائصَ أساسيةٍ غير معروفة، من المقبول أن هذه الخصائص غير المعروفة تتفاعل فيما بينها، ولا بد، بسرعةٍ أكبرَ من سرعة الضوء. على الرغم من ذلك، فبعض النُّسخ التي تتبنَّى نُهُج الذرائعية — لا سيما نسخة «ميكانيكا بيشان الكميَّة» التي طوَّرها علماء الفيزياء كريس فوكس وروديجار شاك وديفيد ميرمين — تتجاوز متباينةَ بيل على ما يبدو. تتكبَّد هذه النُّسخ ثمنًا باهظًا مقابل ذلك؛ فهي تنكِر أنه من المنطقي أصلًا التحدُّث بموضوعية عن نتائج قياسات متعدِّدة أجراها راصدون متباعدون. وفي نظر أنصار ميكانيكا بيشان الكميَّة، فإن الفيزياء لا تُعنى إلا بالملاحظات الرصدية لعالِم بمفرده، وبما أن هذا «العالِم الفرد» لا يمكنه أن يوجَد في مكانين في آنٍ واحد، فإنَّ متباينة بيل لا تنطبق في هذه الحالة (على حدِّ قولهم). الحق أنَّ معظم الفلاسفة متشككون في مدى منطقية هذه المسألة، وأعترف أني أشاركهم في هذا التشكك.

ما الفائدة؟

من بين النُّهج التي تناولتها حتى الآن، فإن نُهُج الذرائعية وتفسير إيفريت تحظى بالرواج نفسه تقريبًا بين علماء الفيزياء (وكما ذكرت، فإن نُهج تغيير الفيزياء تحظى برواجٍ أقلَّ منها بكثير). ولكن الرأي الأكثر رواجًا في مجتمع الفيزياء هو ما يُطلِق عليه عالِم الفيزياء ديفيد ميرمين «تفسير اصمت واحسُب»: وهو رأيٌ مُفاده أننا ينبغي ألا نقلق إزاء هذه المسائل، بل كلُّ ما علينا هو أن نواصل تطبيق ميكانيكا الكم على المسائل الملموسة.

ثمَّة الكثير مما يقال عن نَهج «اصمت واحسُب» في الموضع المناسب لذلك. فليس لزامًا أن يهتم الجميع بتفسير ميكانيكا الكم؛ فينبغي لعالِم الفيزياء الذي يعمل على النيوترينوات الشمسية مثلًا، أو السيولة الفائقة، أن يمضيَ قُدمًا في تطبيق الجانب الصوري من ميكانيكا الكم، من دون أن يأبه لتفسيره بقَدْر ما يُتاح له ذلك؛ وذلك مثلما يجوز لعالِم الكيمياء الحيوية أن يتجاهل ميكانيكا الكم بالكامل، أو مثلما يجوز لعالِم البيئة السلوكي أن يتجاهل الكيمياء الحيوية. لا مفرَّ من تقسيم العمل في العلوم، بل يكون مستحبًّا في كثير من الأحيان.

على الرغم من ذلك، ثمَّة تفسيرٌ أكثرُ عدائية لعبارة «اصمت واحسُب»؛ إذ لا تُعَد وصفًا لنَهج خاص بعالم فيزياء فحسب، بل تُعَد حثًّا للمجتمع للتوقف عن إهدار الوقت. غالبًا ما يُصحب هذا الحثُّ بالزعم أنه ما دامت كل «تفسيرات ميكانيكا الكم» تُنتِج التوقعات نفسها على أي حال، فلا جدوى من الانشغال بتحديد التفسير الصحيح، بل إنه يُعَد خروجًا على المنهج العلمي.

ثمَّة إجابةٌ مثالية بعض الشيء على هذا التشكك: تخبرنا نظريةُ الكم عن أعمقِ طبيعة للواقع؛ فكيف لا نهتم بطبيعة الواقع؟ ويوجد أيضًا المزيد من الأشياء العملية التي يمكن قولها بشأنِ هذا التشكك؛ لأن الادعاء بأن السؤال غير علمي يستند إلى رؤية شديدة التبسيط لفلسفة العلم. رأينا في الفصل الأول أن نقص الإثبات — عندما تَطرح نظريتان مختلفتان التنبؤاتِ نفسها — مسألةٌ دقيقة؛ إذ إنَّ أمرَ المنافسة بين هاتَين النظريتَين لا يُحسم غالبًا باختبار واحد قاطع، بل بتطوُّر النظريتَين بمرور الوقت بينما تُعدَّلان للتنبؤ بفئاتٍ أوسعَ من الظواهر وتفسيرها، ويمكننا أن نرى هذا جليًّا في الجدال بشأن تفسير ميكانيكا الكم.

تبدو هذه المسألةُ في أوضحِ صورها من خلال نُهج «تغيير الفيزياء». تتمثَّل هذه النُّهج في مقترحاتٍ بنظريات متمايزة فعليًّا من الناحية الرياضية. في بعض الحالات،

تطرح هذه النظريات تنبؤات — وإن كان من الصعب اختبارها — تميِّزها عن نظريةِ الكم غير المعدَّلة؛ وفي حالات أخرى، تكون بذورًا لبرامجَ بحثية قد تؤدي إلى اتجاه مختلف — على نحوٍ قابل للاختبار — عن نظرية الكم. قد نختلف بشأنِ ما إن كان هذا التوجُّه واعدًا أم غير واعد في مجال العلوم، لكنه ينتمي إليها دون شك. (وهذا لا يعني أن جميع المدافعين عن هذه النظريات يتعاملون معها على هذا النحو — من الاختبارات الجيدة لمدى جِدِّية أحد أنصار نظرية الانهيار الديناميكي مثلًا، أو نظرية المتغيِّر الخفي بشأن اقتراحه باعتباره علمًا، هو ما إذا كان يُرحِّب بالإشارة الضمنية إلى أنه قد يكون لنظريته انحرافاتٌ عن ميكانيكا الكم قابلةٌ للاختبار، أم يقاومها.)

على الرغم من ذلك، توجد فروقٌ كبيرة في الطريقة العلمية، حتى فيما بين تلك النُّهج التي تترك الجانب الصوري من دون تغيير: النُّهج الشبيهة بتفسير إيفريت القائمة على انعدام الاتساق وانبثاق بنية تفرُّع كلاسيكية، والنُّهج التي تُعامِل الحالة الكمية بصفتها حالةً احتمالية. وبوجهٍ عام، يُطبَّق تفسير إيفريت في الحالات التي تهدف إلى فَهْم كيفية تطوُّر الأنظمة دون تحكُّم أو توجيه. الحق أنه نهجٌ مركزي في فَهْمنا لحالات الانتقال بين نظريات الكم والنظريات الكلاسيكية، وهو يُستخدم في بيئاتٍ تتنوَّع ما بين مختبرات عصرنا الحالي وحتى بداية الكون؛ إنه يقدِّم إطارًا ولغةً للتعامل مع المواقف التي لا يكون لمصطلحَي «التجربة» و«القياس» فيها معنًى واضح؛ ثم إنَّ لغته المتمثِّلة في مصطلحاتٍ مثل «الفروع» و«العوالم» قيِّمةٌ في علم الكونيات الكمي والميكانيكا الإحصائية لعدم الاتزان؛ إنه يتعامل مع إطار نظرية الكم على أنها من المعطيات ويستخدمها لفَهْم المشكلات في نظريات الكم المحدَّدة واستكشافها؛ وهو أيضًا النَّهج السائد في فيزياء الطاقة العالية وفي نظرية الأوتار. أما التفسيرات القائمة على الاحتمالات، فتُستخدم بدرجةٍ أكبر في المواقف التي تهدف إلى فَهْم حالات التدخُّل والمعالجة التي قد نجريها في نظامٍ ما؛ فهي مناسِبة تمامًا لدراسةِ إمكانية الحوسبة ومعالجة المعلومات، وقد كانت مصدرَ إلهامٍ للكثير من الأعمال البارعة في هذه المجالات؛ وتقودنا هذه النُّهج بطبيعة الحال إلى التساؤل عن السبب في أنَّ إطار نظرية الكم على ما هو عليه وليس شيئًا آخر؛ وهذه النُّهج هي السائدة في نظرية المعلومات الكميَّة.

ولا يعني هذا أن كلَّ مَن استخدم النُّهج القائمة على انعدام الاتساق لدراسة علم الكونيات؛ ملتزمٌ صراحةً بتفسير إيفريت ولغته المتمثلة في مصطلح «العوالم المتعددة»، ولا أن كلَّ مَن استفاد من تفسير احتمالي لنظرية الكم في إثبات نظريةٍ قيمةٍ في معلومات

الكم؛ ملتزمٌ صراحةً بأحد ضروب مذهب الذرائعية. كلُّ ما يعنيه أنَّ الدراسة النظرية لمسألة القياس الكمي أنتجت تدفقًا مستمرًّا من الأفكار، وعناصر الإلهام أثَّرت في المسائل الملموسة في نظرية الكم، والعكس بالعكس. إننا نَدين بالكثير من الفضل في فَهْمنا الحالي لميكانيكا الكم وفَهْمنا لأيٍّ من النظريات العميقة في الفيزياء، إلى مَن مضَوا قُدمًا وأجرَوا القياسات، حتى عندما كان الأساس المفاهيمي لتلك الحسابات غيرَ واضح. لكننا نَدين بالمزيد من الفضل إلى هؤلاء الذين اختاروا — وقت إجراء الحسابات — ألَّا يصمتوا، بل اختاروا أن يفكروا جليًّا فيما تعنيه الفيزياء. ليس هناك ما يدعو إلى الاعتقاد بأن هذه العملية قد انتهت، وما من سببٍ يجعلنا لا نتوقَّع أن التداخل بين الحسابات والفلسفة في نظريةِ الكم — وفي الفيزياء بوجهٍ أعم — سيقودنا إلى مزيدٍ من التعمُّق في فَهْمنا لهذه النظريات المهمة، لكنها لم تزل غيرَ واضحة تمام الوضوح.

قراءات إضافية

In philosophy, as in any academic area where there is genuine controversy, the best way to get an understanding of that controversy is to read multiple sources and to read them critically; I have tried to err in favour of readings that disagree with my own take on the subject. The readings I include are at quite varied levels, and I use a star system to indicate this. Unstarred readings are at about the level of this book; single-starred entries are at about the level of an undergraduate degree; double-starred entries are more advanced.

فلسفة العلوم العامة (الفصل الأول)

D. Deutsch, *The Fabric of Reality* (Viking, 1997). A lively, opinionated, nontechnical discussion of falsificationism (and much else).

T. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, 2nd edition (University of Chicago Press, 1970). (*)

I. Lakatos, 'Science and Pseudoscience' and 'Falsification and the Methodology of Scientific Research Programs,' in *Philosophical Papers* vol. 1 (Cambridge, 1978). (*)

J. Ladyman, *Understanding Philosophy of Science* (Routledge, 2002). A general introduction to the philosophy of science.

J. Ladyman and D. Ross, 'Scientific Realism, Constructive Empiricism and Structuralism,' *Every Thing Must Go: Metaphysics Naturalised* (OXford University Press, 2007), chapter 2. An up-to-date guide to issues in instrumentalism, realism, and structuralism, and a good route into the wider literature. (**)

B. van Fraassen, *The Scientific Image* (Oxford University Press, 1980). An influential critique of realism, and one of the most important recent attempts to defend an observable/unobservable distinction. (*)

فلسفة الزمان والمكان (الفصلان: الثاني والثالث)

J. Barbour, *The End of Time* (Oxford University Press, 1999). An insightful and accessible account of the substantivalist/relationist debate, very much from the relationist's point of view.

J. Barbour, *The Discovery of Dynamics* (Oxford University Press, 2001). An extended history of space, time, and motion in physics. (*)

J. Bell, 'How to Teach Special Relativity,' *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, 2nd edition (Cambridge University Press, 2004). Classic, though technical, critique of the geometry-first approach to special relativity, and defence of the pedagogical value of the alternative. (**)

H. Brown, *Physical Relativity: Space-Time Structure from a Dynamical Viewpoint* (Oxford University Press, 2005), pp. 95–105. A historical and philosophical exploration of relativity, expounding and defending the dynamics-first approach. (**)

J. Earman, *World Enough and Space-Time: Absolute vs Relational Theories of Space and Time* (MIT Press, 1989). The standard graduate-level philosophy text on philosophy of spacetime. (**)

N. Huggett, *Space from Zeno to Einstein: Classic Readings with a Contemporary Commentary* (MIT Press, 1999). Some of the key writings

of Newton, Leibniz, and others, accompanied by clear and helpful discussion notes by Huggett.

E. Knox, 'Newtonian Spacetime Structure in Light of the Equivalence Principle,' *British Journal for the Philosophy of Science* 65 (2014) pp. 863–80. Technical article on the interpretation of Newtonian gravity. (**)

T. Maudlin, *Philosophy of Physics: Space and Time* (Princeton University Press, 2012). Chapters 1–3 present and defend the geometry-first approach to understanding spacetime and motion. Very clear, from a very specific viewpoint (a viewpoint very different from the one I adopt here). (*)

O. Pooley, 'Substantivalist and Relationist Approaches to Spacetime,' in R. Batterman (ed.), *The Oxford Handbook of the Philosophy of Physics* (Oxford University Press, 2013), pp. 522–86. A review article: up-to-date reference for the subject. (**)

E. F. Taylor and J. A. Wheeler, *Spacetime Physics*, 2nd edition (W. H. Freeman, 1992). My favourite of the many introductory books on special relativity; strongly emphasizes the spacetime perspective. (The whole book is available online for free at http://www.eftaylor.com/spacetimephysics/ under a Creative Commons license.) (*)

فلسفة الميكانيكا الإحصائية (الفصل الرابع)

D. Albert, *Time and Chance* (Harvard University Press, 1999). One of the most influential philosophy books on statistical mechanics in recent years; idiosyncratic but insightful. (*)

S. Carroll, *From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate Theory of Time* (Dutton, 2010). Ambitious but very accessible discussion of time and irreversibility, covering the topics of this chapter but going beyond to more speculative ideas in cutting-edge physics.

R. Feynman, 'The Distinction of Past and Future,' *The Character of Physical Law* (MIT Press, 1965), chapter 5. Introduction to the issues from a distinguished physicist.

H. Price, *Time's Arrow and Archimedes' Point* (Oxford University Press, 1996). Extended defence of the idea that our distinction between past and future misleads and confuses us.

L. Sklar, *Physics and Chance: Philosophical Issues in the Foundations of Statistical Mechanics* (Cambridge University Press, 1993). Advanced graduate-level discussion of philosophy of statistical mechanics: a good reference, if slightly out of date by now. (**)

D. Wallace, 'Inferential vs. Dynamical Conceptions of Physics,' in O. Lombardi (ed.), *What is Quantum Information?* (Cambridge University Press, 2017). Technical presentation of the inferential/dynamical dichotomy, in both statistical and quantum mechanics. (**)

فلسفة ميكانيكا الكم (الفصلان: الخامس والسادس)

S. Aaronson, *Quantum Computing Since Democritus* (Cambridge University Press, 2013). Often-insightful, often-infuriating, always-worthwhile, idiosyncratic look at quantum mechanics.

D. Albert, *Quantum Mechanics and Experience* (Harvard University Press, 1994). Reasonably non-technical introduction to the quantum measurement problem, aimed at philosophers.

S. Carroll, *Something Deeply Hidden: Quantum Worlds and the Emergence of Spacetime* (Dutton, 2019). Non-technical exposition and defence of the Everett interpretation.

C. Fuchs and A. Peres, 'Quantum Theory Needs No "Interpretation",' *Physics Today* 53 (2000) pp. 70-1. Brief, clear, forceful advocacy of the instrumentalist approach. See also the letters to the editor, and Fuchs and Peres reply, also in *Physics Today* 53. (*)

C. Fuchs, N. Mermin, and R. Schack, ‘An Introduction to QBism with an Application to the Locality of Quantum Mechanics,’ *American Journal of Physics* 82 (2014) pp. 749–54. (*)

R. Healey, *The Quantum Revolution in Philosophy* (Oxford University Press, 2017). Explores quantum mechanics from a ‘pragmatist’ point of view fairly closely related to the instrumentalist position. (*)

T. Maudlin, *Philosophy of Physics: Quantum Theory* (Princeton University Press, 2019). Very readable presentation of the measurement problem, followed by detailed (and opinionated) exposition of dynamical-collapse theories, of the de Broglie–Bohm theory, and of the Everett interpretation. Largely ignores probabilistic and/or instrumentalist approaches. (*)

A. Rae, *Quantum Physics: Illusion or Reality?*, 2nd edition (Cambridge University Press, 2004). A general, accessible introduction to the quantum measurement problem and the range of solutions that have been proposed.

R. Penrose, *Shadows of the Mind* (Oxford University Press, 1994), chapters 5-6. Self-contained but reasonably demanding introduction to conceptual problems in QM. (*)

D. Wallace, ‘Philosophy of Quantum Mechanics,’ in D. Rickles (ed.), *The Ashgate Companion to Contemporary Philosophy of Physics* (Ashgate, 2008). Review article, at a reasonably high level (presumes knowledge of quantum mechanics at advanced undergraduate level). (**)

D. Wallace, *The Emergent Multiverse: Quantum Theory According to the Everett Interpretation* (Oxford University Press, 2012). My own book-length treatment of the Everett interpretation; advanced in places. (**)

المراجع

المقدمة

The Daniel Dennett quote is from Blackmore, Susan (ed.) (2005), *Conversations on Consciousness*. Oxford University Press (Oxford), p. 91.

الفصل الأول: مناهج العلوم وثمارها

'Try not to say anything false:' Fodor, Jerry (2008), *LOT 2: The Language of Thought Revisited.* Oxford University Press (Oxford), p. 4.

الفصل الثاني: الحركة والقصور الذاتي

'Indeed it is a matter of great difficulty:' Newton, Isaac (1689), 'Scholium to the Definitions,' in *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, Bk. 1, translated by Andrew Motte (1729), revised by Florian Cajori. University of California Press (Berkeley, CA, 1934).

'Shut yourself up with some friend:' Galileo (1632), *Dialogue Concerning the Two Chief World Systems*, translated by Stillman Drake. University of California Press (Berkeley, CA, 1967).

الفصل الثالث: النسبية وفلسفتها

‘spreading time through space:’ Brown, Harvey (2005), *Physical Relativity: Space-time Structure from a Dynamical Perspective.* Oxford University Press (Oxford), p. 21 *et seq*.

الفصل الرابع: الاختزال وعدم القابلية للانعكاس

‘in the process of turning around:’ Albert, David (1999), *Time and Chance.* Harvard University Press (Cambridge, MA), p. 77.

الفصل السادس: تفسير الكم

‘shut-up-and-calculate interpretation’: Mermin, David (2004), ‘Could Feynman have said this?’, *Physics Today* 57, p. 10.

قائمة الصور


أهم جروبات علي تليجرام
باحثون
هنا سور الأزبكية
غواص في بحر الكتب
قناة مصر الثقافية و الفنية